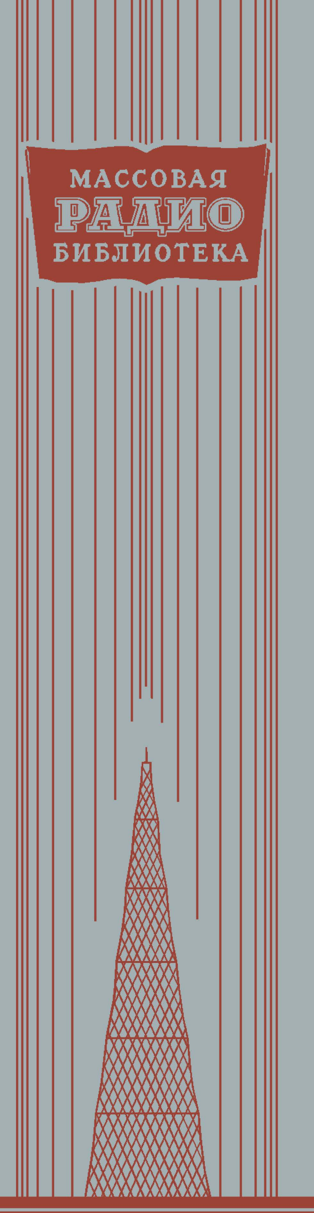
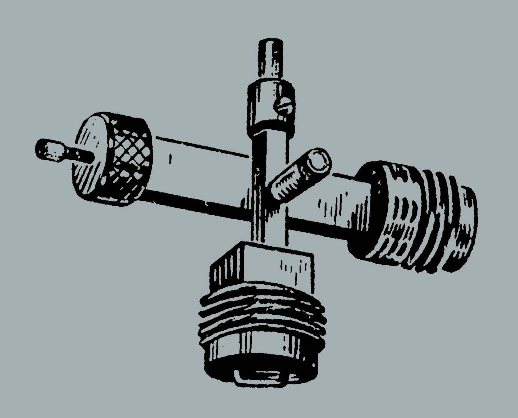


Г. Б. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ





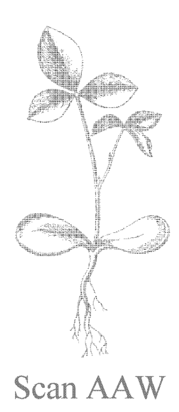
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 352

Г. Б. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

Брошюра знакомит радиолюбителей с применением миллиметровых волн и особенностями их излучения, распространения, приема и усиления.

Цель брошюры — расширить кругозор читателя в направлении освоения сравнительно новой и перспективной области радиотехники — техники миллиметровых волн.

Брошюра рассчитана на читателей, имеющих элементарные знания по радиолокации и технике сантиметровых волн.

Белоцерковский Григорий Бенционович

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ

* * *

Редактор *Ю. А. Сагайдачный* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 10/VII 1959 г. Подписано к печати 23/IX 1959 г.
Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$ 4,1 п. л. 4,7 уч.-изд л.
Т-10264 Тираж 46 000 Цена 1 р. 90 к. Зак. № 405

Типография Госэнергоиздата Москва Шлюзовая наб., 10

ВВЕДЕНИЕ

Миллиметровыми волнами называются такие электромагнитные колебания, длина волны λ которых находится в пределах от 1 до 10 *мм*, а частота — от 30 000 до 300 000 *Мгц*. Различают также субмиллиметровые волны, длина которых — от 0,1 до 1 *мм*, а частота — от 300 000 до 3 000 000 *Мгц*. Низкочастотная граница миллиметровых волн примыкает к сантиметровым радиоволнам, а высокочастотная граница субмиллиметровых волн—к инфракрасным (тепловым) лучам. Миллиметровые волны были впервые получены в 1895 г. русским ученым П. Н. Лебедевым.

В последние два десятилетия усилия многих радиоспециалистов были направлены на изучение и практическое применение колебаний сверхвысоких частот, сначала метровых волн (λ=1—10 *м*), затем дециметровых (λ=10 *см*—1 *м*) и сантиметровых (λ=1—10 *см*).

Очередным, новым этапом в развитии радиотехники является освоение миллиметровых волн. Электромагнитные колебания миллиметрового диапазона уже давно привлекали внимание радиоспециалистов. С их помощью можно было бы разрешить много технических проблем, осуществление которых немыслимо на более длинных волнах.

По мере развития радиосвязи и радиовещания, например, возникает потребность во всемерном расширении диапазона радиочастот, пригодного для этой цели. Если для одноканальной связи достаточно полосы частот шириной 4 *кгц*, а для удовлетворительного радиовещания 8—9 *кгц*, то для высококачественного радиовещания с амплитудной модуляцией требуется полоса частот 15 *кгц*, для передачи радиовещательных программ с помощью частотной модуляции 150 *кгц*, а для черно-белого телевидения — около 4 *Мгц*.

Миллиметровые волны в этом отношении открывают большие возможности. В то время как весь диапазон ча-

стот, отведенный для радиовещания, имеет ширину около 1 *Мгц*, только небольшая часть миллиметрового диапазона в пределах от 8 до 9 *мм* занимает ширину 4 200 *Мгц*. В этой части миллиметрового диапазона можно было бы осуществить телефонную связь примерно на 850 000 каналах или одновременно передавать около 1 000 телевизионных программ.

Большое затухание миллиметровых волн в атмосфере крайне ограничивает дальность радиосвязи. В связи с этим были произведены опыты дальней передачи миллиметровых волн с помощью волноводов. Результаты опытов оказались положительными.

Миллиметровые волны нашли применение в радионавигации. Уже разработаны радиосекстанты — приборы миллиметрового диапазона, указывающие в любое время суток, в любых метеорологических условиях направление на Солнце. С помощью радиосекстанта независимо от оптической видимости экипаж корабля или самолета располагает надежным навигационным ориентиром.

В радиолокации и радиоастрономии большие трудности вызывают создание остронаправленного излучения и приема. Для того чтобы антенна была остронаправленной, ее линейные размеры должны намного превышать длину волны. Поскольку миллиметровые волны самые короткие из применяемых в радиотехнике, эта задача резрешается наиболее просто в станциях миллиметровых волн. Относительно малые габариты и высокая направленность миллиметровых антенн являются одной из причин, по которой миллиметровые волны все более широко внедряются в радиолокацию и радиоастрономию. Астрономические исследования, произведенные на миллиметровых волнах, позволили получить новые, весьма полезные сведения о небесных телах.

Миллиметровые волны нашли применение также в спектроскопии. Это значительно расширило наши познания о строении различных веществ. В частности, на основе сведений о структуре молекул аммиака создан молекулярный генератор, который на наиболее коротких сантиметровых волнах, граничащих с миллиметровыми волнами, генерирует колебания, отличающиеся необычайно высокой стабильностью частоты. Одновременно для той же части радиотехнического диапазона разработан молекулярный усилитель, уровень шумов которого в десятки и сотни раз меньше уровня шумов электронных усилителей. Молеку-

лярные усилители позволяют принимать весьма слабые сигналы и этим расширяют возможности радиолокации и радиоастрономии.

Освоению миллиметровых волн препятствует ряд обстоятельств. К ним относятся сильное поглощение энергии в большей части миллиметрового диапазона, а также трудности генерирования, приема и передачи. Эти трудности, характерные для всего диапазона сверхвысоких частот, возрастают с увеличением частоты. Вот почему до сих пор наименее освоенными являются миллиметровые волны.

Настоящая брошюра знакомит читателя с новой перспективной областью радиотехники — техникой миллиметровых волн. В брошюре сначала описываются резонансные и нерезонансные цепи миллиметровых волн. Затем характеризуются особенности генерирования, излучения, распространения и приема радиоволн миллиметрового диапазона. После этого рассматривается практическое применение миллиметровых волн. Так как между различными диапазонами частот отсутствует резкая грань, то в брошюре также затрагиваются некоторые вопросы, связанные с техникой наиболее коротких сантиметровых волн.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

Электрические цепи низких радиочастот делятся на цепи с сосредоточенными и распределенными постоянными. Примером первых могут служить обычные колебательные контуры, а примером вторых — линии передачи. На миллиметровых волнах такое деление цепей произвести нельзя, так как даже минимально возможные размеры элементов контура оказались бы соизмеримыми с длиной волны и ток в любой момент времени был бы неодинаковым в различных сечениях контура, что является признаком цепей с распределенными постоянными.

На миллиметровых волнах применим более общий отличительный признак: в колебательных системах используется явление резонанса, а линии передачи являются нерезонансными цепями.

В диапазоне миллиметровых волн в качестве колебательных систем могут быть использованы объемные резонаторы. Это — металлические оболочки, внутренняя поверхность которых обладает высокой проводимостью. Объемные резонаторы, применяемые на практике, имеют различную форму.

Наиболее просто объемный резонатор можно представить в виде цилиндра (рис. 1), образованного в результате параллельного включения короткозамкнутых линий *авгб*, *адеб* и т. д., настроенных в резонанс. Если одиночная короткозамкнутая линия имеет к примеру длину $\lambda/4$, т. е. четверть длины волны, то ее входное сопротивление очень велико и она эквивалентна параллельному контуру при резонансе. Отсюда следует, что сопротивление, измеренное между точками *аб*, существенно не изменяется от подклю-

чения такого рода линий и образующийся в пределе цилиндр также обладает резонансными свойствами.

В полученном цилиндре, как и в любом колебательном контуре, энергия электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля и обратно. Распределение этих полей можно легко себе представить, если иметь в виду, что напряженность электрического поля прямо пропорциональна напряжению, а напряженность магнитного поля прямо пропорциональна току, причем силовые линии магнитного поля перпендикулярны линиям тока. Согласно свойствам стоячих волн в короткозамкнутой линии в цилиндрическом резонаторе, показанном на рис. 1, максимум напряженности электрического поля расположен по *аб*, а максимум напряженности магнитного поля находится у боковых стенок (*вг*, *де*).

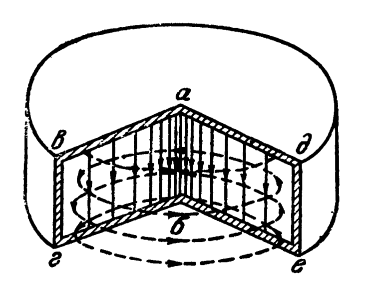


Рис. 1. Цилиндрический объемный резонатор.
Электрическое поле обозначено сплошными линиями, магнитное — пунктиром.

Резонансная длина волны такого резонатора для показанных на рис. 1 полей зависит только от его диаметра. При соответствующих размерах резонатора и способе возбуждения в нем можно получить электромагнитные поля другого характера, такие, например, в которых электрическое поле находится в поперечной плоскости, а магнитное поле имеет продольную и поперечную составляющие, причем напряженности полей изменяются не только по радиусу цилиндра, как в данном случае, но и по его образующим. Тогда резонансная длина волны зависит и от высоты цилиндра.

Цилиндрический резонатор с переменной высотой используется в объемном волномере, представленном на рис. 2. Резонатор *1* образован цилиндром *2*, неподвижной стенкой *3* и поршнем *4*, который с помощью микрометрического винта *5* перемещается по высоте. Возбуждение резонатора производится от генератора через волновод *6* и щель *7*, а противоположная щель *8* и волновод *9* соединяют резонатор с детектором и индикатором.

Перемещением поршня *4* можно добиться того, чтобы полость *1* была настроена в резонанс с генератором. Тогда в резонаторе интенсивность колебаний достигает максиму-

ма и отсчет длины волны производится по шкале микрометрической головки в момент максимальных показаний индикатора.

Почему же на миллиметровых волнах нельзя использовать обычные колебательные контуры и их заменяют объемными резонаторами?

Во-первых, поскольку размеры реального контура миллиметрового диапазона сравнимы с резонансной длиной волны, то каждый элемент такого контура уподобляется антенне, интенсивно излучающей электромагнитные волны, а в объемном резонаторе потери на излучение исключены благодаря экранированию электромагнитных полей от внешней среды оболочкой резонатора.

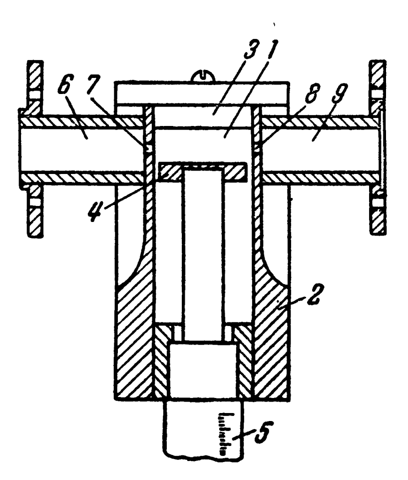


Рис. 2. Резонансный волномер миллиметрового диапазона.

1 — резонатор; *2* — цилиндр; *3* — неподвижная стенка; *4* — поршень; *5* — микрометрический винт; *6* и *9* — волноводы; *7* и *8* — щели.

Во-вторых, в обычном контуре потери на токи проводимости были бы чрезвычайно большими из-за того, что глубина поверхностного слоя, через который проходит ток миллиметровых волн, не превышает десятых долей микрона; в объемном резонаторе это обстоятельство не сказывается в такой мере вследствие большего поперечного сечения проводящей поверхности.

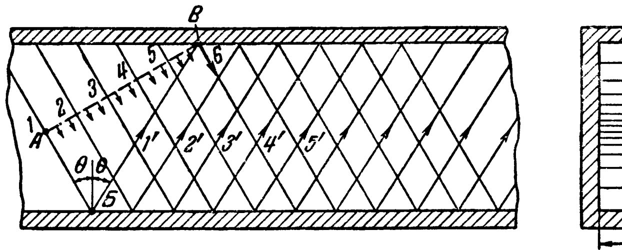
Наконец, объемный резонатор отличается жесткостью конструкции и высокой стабильностью параметров, немыслимых в обычном контуре миллиметрового диапазона, так как размеры контура должны быть ничтожно малыми.

Характерно, что резонаторы на миллиметровых волнах даже объемные малы по размеру. Например, резонатор описанного волномера для работы в диапазоне волн 5,66—7,16 *мм* должен иметь внутренний диаметр 9,42 *мм*. Это предъявляет повышенные требования к точности изготовления резонатора и ограничивает мощность колебаний, которую можно в нем получить.

2. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Металлические волноводы. В диапазоне миллиметровых волн двухпроводные и коаксиальные линии не могут быть использованы для передачи электромагнитной энергии. На этих волнах линиями передачи являются волноводы. Различают металлические и диэлектрические волноводы.

Первые представляют собой полые металлические трубы прямоугольного или круглого сечения. Распространение энергии в них можно представить как результат отра-



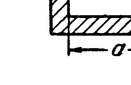


Рис. 3. Волна TE_{01} в прямоугольном волноводе.

жения волн от противоположных стенок волновода. Каждая из отраженных волн колеблется с одинаковой амплитудой, но результирующее электромагнитное поле, полученное при сложении волн, отразившихся от противоположных стенок волновода, имеет неодинаковую напряженность в его поперечном сечении.

Рис. 3 служит иллюстрацией к прохождению волны типа TE_{01} в прямоугольном волноводе. Для этой волны характерно, что линии электрического поля расположены только в поперечной плоскости (отсюда название волны— поперечноэлектрическая ТЕ), причем вдоль узкой стенки поле не изменяется (первый индекс 0), а вдоль широкой стенки поле изменяется на одну стоячую полуволну (второй индекс 1). Иными словами, силовые линии электрического поля параллельны нижней стенке волновода, а амплитуда напряженности поля максимальна в середине широкой стенки и равна нулю на ее краях. В момент отражения волны фаза ее изменяется на обратную, благодаря чему на узких стенках волновода результирующее электрическое поле отсутствует.

Какие же преимущества имеет волновод перед двухпроводной и коаксиальной линиями?

В волноводе полностью экранируются электромагнитные поля и отсутствуют потери на излучение. Потери на токи проводимости уменьшаются благодаря отсутствию внутреннего провода и большому поперечному сечению волновода. По той же причине увеличивается передаваемая мощность. В волноводе нет диэлектрических опор и заполнителя, благодаря чему дополнительно уменьшается затухание. Указанные преимущества на миллиметровых волнах используются неполно из-за критичности поперечных размеров волновода. Разъясним это подробнее, используя рис. 3.

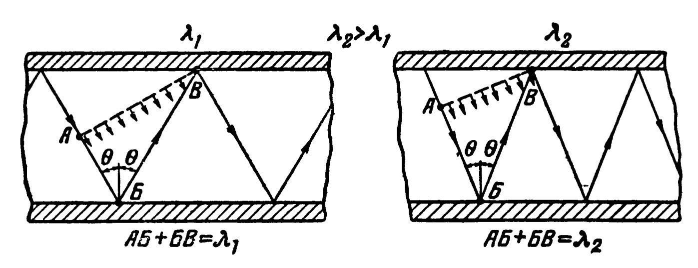


Рис. 4. Траектория движения элементарных волн в волноводе при различных значениях длины волны.

В каждой точке внутреннего пространства волновода встречаются две волны, из которых одну можно рассматривать как падающую на нижнюю стенку волновода, а другую — как отраженную от этой стенки. В точке *В*, например, пересекаются луч *6* падающей и луч *1'* отраженной волны. Оба луча, встречаясь, должны находиться в противофазе, так как по условию в любой точке узких стенок волновода электрическое поле равно нулю. Поскольку в точке *Б* фаза волны изменяется на обратную, а лучи *1* в точке *А* и *6* в точке *В* находятся в равной фазе (линия *АВ*, перпендикулярная лучам *1*, *2*,... *6*, является их фронтом), данное условие выполняется, если путь $АБ + БВ$, пройденный волной, равен целому числу длин волн. В случае волны TE_{01} это число минимальное, т. е. равно единице:

$$АБ+БВ=\lambda.$$

Согласно этому равенству и рис. 4 с увеличением длины волны ($\lambda_2 > \lambda_1$) угол θ должен уменьшаться. Когда же λ достигает значения критической длины волны $\lambda_{кр}$, угол θ становится равным нулю, волны падают отвесно на стенки

волновода и вдоль его оси не перемещаются. Тогда наступают равенства

$$\lambda = \lambda_{кр} \text{ и } АБ + БВ = 2b,$$

где b — размер широкой стороны поперечного сечения волновода.

Из приведенных равенств находим, что критическая длина волны

$$\lambda_{кр} = 2b.$$

Таким образом, для движения электромагнитной энергии в волноводе длина волны λ должна быть меньше критической $\lambda_{кр} = 2b$, а размер b должен быть больше, чем $\lambda/2$. Размер узкой стенки $a \approx b/2$.

На сантиметровых волнах эти размеры вполне приемлемы, а на миллиметровых волнах — чрезмерно малы. Например, для работы в диапазоне волн $\lambda = 6{,}12 - 9{,}1$ *см* применяется волновод, в котором $a = 29{,}17$ *мм* и $b = 58{,}16$ *мм* ($\lambda_{кр} = 11{,}7$ *см*), а для волн $\lambda = 1{,}36 - 2$ *см*, $a = 6{,}47$ *мм*, $b = 12{,}95$ *мм*, тогда как для передачи волн $\lambda = 1{,}2 - 1{,}8$ *мм* размеры поперечного сечения приходится сокращать до $a = 0{,}55$ и $b = 1{,}09$ *мм* ($\lambda_{кр} = 2{,}18$ *мм*).

Изготовление столь малых по размерам волноводов связано с большими трудностями. Их нельзя изготовить методом протяжки. Приходится применять электролитические способы, и только внешняя поверхность волноводов обрабатывается на станке. Материалами для изготовления волноводов служат медь, латунь и серебро. Точность изготовления должна быть порядка сотых долей миллиметра.

Особенно важно обеспечить однородность покрытия внутренних стенок волновода, поскольку шероховатость проводящего слоя должна быть по крайней мере в 2 раза меньше глубины погружения тока, которая в данном случае крайне мала. Отсюда, например, для волны $\lambda = 3$ *мм* чистота обработки поверхности определяется величиной порядка 0,0001 *мм*. В противном случае сильно возрастает поглощение энергии волны в волноводе.

Даже при таком тщательном изготовлении металлических волноводов потери в них при распространении миллиметровых волн превышают в десятки, а иногда и в сотни раз потери, наблюдаемые при передаче сантиметровых волн. Причиной этого являются малый периметр сечения

и малая глубина погружения тока в волноводах миллиметровых волн.

В миллиметровом диапазоне находят также применение круглые волноводы, возбуждаемые на волне TE_{01} (рис. 5). Это поперечноэлектрическая волна TE, при которой поля вдоль окружности волновода не изменяются (первый индекс 0), а по диаметру образуют одну стоячую полуволну (второй индекс 1).

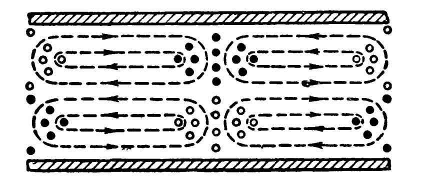
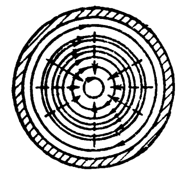



Рис. 5. Волна TE_{01} в круглом волноводе.

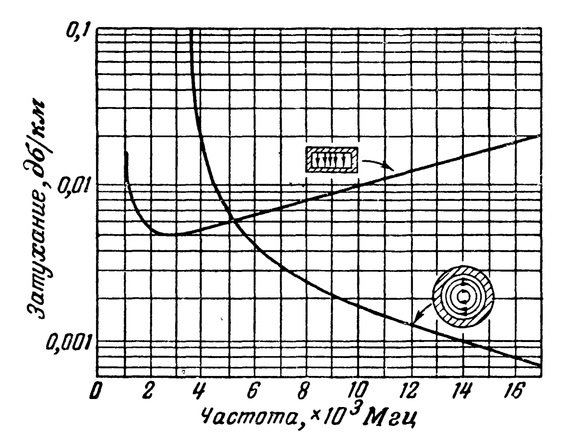


Рис. 6. Зависимость затухания волн TE_{01} в прямоугольном и круглом волноводах от частоты.

Замечательным свойством данной волны, особенно важным для миллиметрового диапазона, является уменьшение затухания с увеличением частоты (рис. 6). Это свойство послужило толчком к разработке волноводных линий дальнего телевизионного вещания и многоканальной телефонной и телеграфной связи, осуществляемой на несущей частоте миллиметрового диапазона. К сожалению, приме-

нение круглых волноводов для передачи миллиметровых волн затрудняется тем, что при малейшей неточности профиля этих волноводов наряду с волной TE_{01} возбуждаются нежелательные волны других типов, которые необходимо отфильтровать.

Спиральные волноводы. В 1954 г. был предложен способ устранения высших типов волн путем использования спиральной конструкции круглых волноводов. Спиральные волноводы представляют собой цилиндрическую спираль из медного изолированного провода диаметром 0,075—0,25 *мм*. Для того чтобы не было излучения энергии во внешнюю среду, спираль окружена цилиндрическим кожухом, изготовленным из сильно поглощающего материала.

Ослабление высших типов волн в спиральном волноводе оказывается возможным благодаря тому, что основная волна TE_{01} имеет поперечную составляющую тока, а высшие типы волн — продольную составляющую тока. В местах расположения зазоров между витками спирали линии продольного тока прерываются. По этой причине высшие типы волн больше затухают, а волны основного типа TE_{01} проходят по волноводу с малыми потерями.

Диэлектрические волноводы. Эти волноводы представляют собой круглые стержни, изготовленные из диэлектрика. Связь между диэлектрическим волноводом, генератором и нагрузкой можно осуществить таким образом: один конец стержня помещается внутри передающего рупорного излучателя, в котором имеется соответствующее электромагнитное поле, а другой конец стержня вводится в пространство, охватывающее место расположения нагрузки.

В диэлектрических волноводах, как и в металлических трубах, электромагнитные поля распространяются в результате отражения волн от противоположных стенок, но в этих процессах имеются некоторые отличия. Вследствие того, что внутренняя поверхность металлических труб обладает почти идеальной проводимостью, а воздух, наполняющий эти трубы, близок к идеальному диэлектрику, волны, падающие на стенки металлического волновода, полностью отражаются от них и электромагнитное поле сосредоточено только внутри трубы. Диэлектрический стержень и воздух отличаются по своим электрическим свойствам значительно меньше, а поэтому электромагнитные волны, распространяясь по стержню, не только отражаются от его поверхности, но и проникают в воздух. В результате, как видно из рис. 7, электрическое и магнитное поля ди-

электрического волновода расположены не только внутри стержня, но и вне его.

В таком распределении полей есть свои преимущества. Они выражаются в уменьшении затухания волн вследствие того, что потери электромагнитной энергии в воздухе значительно меньше, чем в диэлектрике. В целях понижения затухания за счет увеличения доли энергии, переносимой воздухом вдоль волновода, диэлектрические стерж-

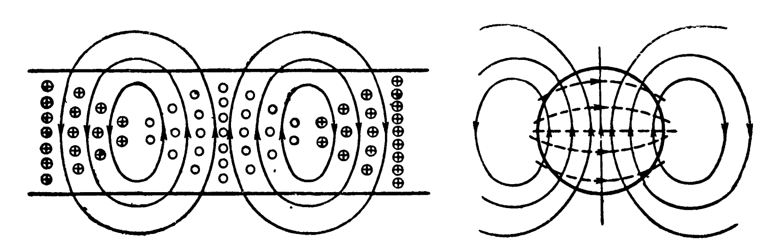


Рис. 7. Волна TE_{11} в диэлектрическом стержне.

ни умышленно изготовляют тонкими, с диаметром меньше 0,35λ.

Такой способ уменьшения потерь в линии передачи ограничен опасностью излучения, т. е. «отрыва» электромагнитных волн от стержня. Последнее особенно наблюдается

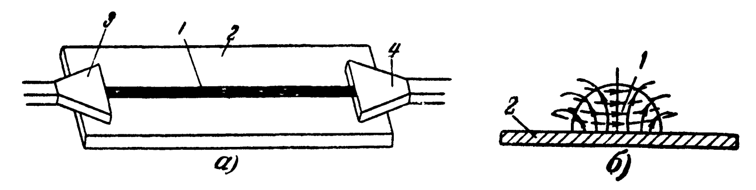


Рис. 8. Эскиз диэлектрической зеркальной линии (*а*) и силовые линии электрического и магнитного полей этой линии (*б*).
1 — диэлектрический стержень; *2* — металлический лист; *3* — передающий рупор; *4* — приемный рупор

на свободном конце стержня, если он не охватывается приемной антенной, или в месте сгиба и крепления стержня. Для того чтобы избежать излучения на поворотах диэлектрического стержня, вблизи них устанавливают специальные металлические отражатели.

Более эффективным является применение диэлектрических зеркальных линий. Такая линия (рис. 8) представляет собой полукруглый стержень *1*, примыкающий своей

плоской частью к поверхности металлического (дюралюминиевого) листа *2*. Преимущество зеркальных личий заключается в том, что они не требуют применения опор, как обычные диэлектрические волноводы, и почти полностью устраняют потери на излучение в месте расположения поворотных участков волновода. Излучение исключается благодаря направляющим свойствам металлического экрана.

В зеркальных линиях легко осуществляются такие элементы линии передачи, как аттенюаторы, предназначенные для получения требуемого затухания, направленные ответвители, индикаторы стоячих волн и т. д.

Диэлектрические зеркальные линии позволяют резко уменьшить затухание. Они широкополосны, отличаются крайней простотой конструкции, не требуют высокой точности изготовления и могут быть получены простым методом напыления диэлектрика на металлический лист. Следует заметить, что в диапазоне сантиметровых волн диэлектрические волноводы имеют довольно большие размеры. На миллиметровых волнах размеры диэлектрических волноводов вполне приемлемы.

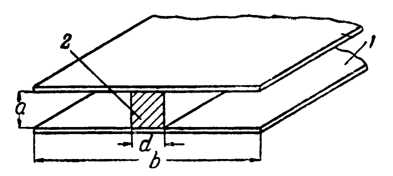


Рис. 9. Н-образный волновод.
1 — металлические пластины; *2* — диэлектрик.

Н-образные волноводы. В диапазоне миллиметровых волн широкое применение, вероятно, получат Н-образные волноводы. Они состоят из двух металлических пластин *1* и диэлектрической пластины *2*, которые образуют в поперечном сечении букву Н (рис. 9). Диэлектрическая пластина в данном случае заменяет собой узкие стенки прямоугольного металлического волновода.

Роль пластин заключается в том, чтобы препятствовать рассеиванию в свободном пространстве той части электромагнитной энергии, которая выходит за пределы диэлектрика.

Эффективность работы Н-образного волновода в значительной степени зависит от того, насколько удается уменьшить потери энергии в диэлектрической пластине и ослабить излучение в окружающее пространство. Для уменьшения излучения необходимо усилить концентрацию энергии в диэлектрической пластине, что можно сделать увеличе-

нием ее толщины d, но тогда увеличиваются диэлектрические потери. Целесообразнее другое решение: диэлектрический стержень сделать более тонким, но вместе с тем увеличить размер $в$ металлических пластин, обеспечив тем самым бо́льшую концентрацию электрических волн внутри воздушной части волновода. Существенное значение имеет выбор материала диэлектрической пластины.

При надлежащем выборе элементов Н-образной линии потери в диэлектрическом стержне получаются меньше, чем в узких стенках соответствующего металлического волновода, которые она заменяет. Правда, для этого размеры

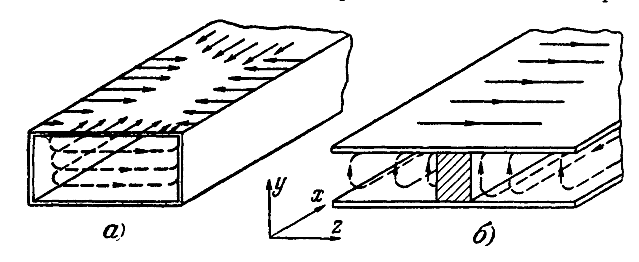


Рис. 10. Линии тока и магнитного поля в металлическом полом волноводе (*а*) и в Н-образном волноводе (*б*).
Линии тока показаны сплошными стрелками, а линии магнитного поля — пунктирными.

Н-образного волновода должны быть несколько больше металлического, но в диапазоне миллиметровых волн это несущественно.

Вторым преимуществом Н-образных волноводов по сравнению с металлическими является уменьшение затухания с ростом частоты. Это, как было сказано, особенно важно при передаче миллиметровых волн.

Отсутствие узких стенок в Н-образном волноводе исключает ограничение длины волны передаваемых колебаний. Отсюда вытекает третье преимущество Н-образных волноводов — их широкополосность.

Существенной особенностью Н-образных волноводов является своеобразное распределение в них магнитного поля. Как известно, на границе идеального проводника и идеального диэлектрика электрические силовые линии могут быть расположены только перпендикулярно, а магнитные силовые линии — только параллельно поверхности проводника. В соответствии с этими условиями линии магнитного поля при волне TE_{01} в металлическом волноводе направлены параллельно его широкой стенке (рис. 10,*а*), а

в Н-образных волноводах — параллельно узкой стороне волновода (рис. 10, *б*).

Поэтому Н-образные волноводы, поскольку в них нет продольного тока, допускают существование небольших зазоров между секциями, в то время как прямоугольные волноводы требуют специальных фланцев.

Наконец, последним преимуществом Н-образных волноводов является простота их конструкции. Такой волновод, например, можно изготовить методом прессования диэлектрика из пластмассы и металлизации его наружной поверхности электролитическим способом (рис. 11). Весьма просто изготовляются и узлы Н-образных волноводов.

Рис. 11. Н-образный волновод простейшей конструкции.
1 — диэлектрик из пластмассы; *2* — металлизированная поверхность.

Линии с поверхностной волной. Рассмотрим еще одну систему передачи миллиметровых волн — линию с поверхностной волной. Эта линия может быть выполнена, в частности, в виде одного металлического провода, покрытого слоем диэлектрика (рис. 12).

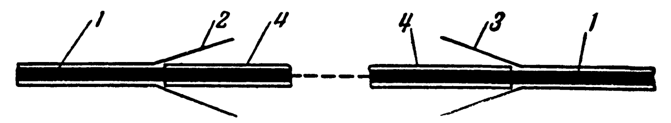


Рис. 12. Однопроводная линия передачи.
1 — коаксиальная линия; *2* — рупор с передающего конца; *3* — рупор с приемного конца; *4* — слой диэлектрика.

Допустим, что имеется коаксиальная линия, внутренний провод которой выходит за пределы линии в открытое пространство. Такое устройство ведет себя по-разному в зависимости от того, обладает ли открытый провод высокой или низкой проводимостью. Если бы провод обладал идеальной проводимостью, то в нем полностью отсутствовали бы электромагнитные волны, они рассеивались бы в большом радиусе вокруг провода и при высоких частотах интенсивно излучались бы во внешнюю среду. Такой вывод основан на том, что активное сопротивление идеального проводника равно нулю, падения напряжения (разности потенциалов) на нем нет, а следовательно, внутри него отсутствует

электрическое поле, которое является обязательной составляющей электромагнитной волны.

По мере уменьшения проводимости открытого провода напряженность электрического поля в нем увеличивается. В результате электромагнитные поля все более концентрируются вокруг провода.

Провод в таком случае мог бы выполнять функции линии передачи, если бы эффективность ее не снижалась большими потерями в металле. Качество линии значительно улучшается, если в ней использовать провод высокой проводимости, но покрытый слоем диэлектрика. В диэлектрике фазовая скорость электромагнитных волн (т. е. скорость, с которой распространяется фронт волны) меньше, чем в воздухе, благодаря чему слой диэлектрика дает такой же эффект, как увеличение сопротивления провода: интенсивность электромагнитного поля в радиальном направлении быстро понижается, и энергия концентрируется вблизи поверхности провода. Вот почему волны в такой линии передачи называются поверхностными.

Чем толще слой диэлектрика, тем больше доля энергии, переносимая внутри диэлектрика, и больше концентрация энергии вокруг провода. Если слой диэлектрика окажется слишком толстым, то потери в диэлектрике значительно возрастут и это опять сделает линию малоэффективной.

Толщину слоя диэлектрика следует выбирать настолько малой, чтобы радиус цилиндрической поверхности, внутри которой сосредоточена основная часть передаваемой энергии, не превышал допустимой величины. Величина этого радиуса зависит от устройства, посредством которого волны передаются в линию. Таким устройством может быть конический рупор, смонтированный как продолжение внешнего провода коаксиальной линии.

Рупор действует тем эффективнее, т. е. охватывает поверхностную волну тем лучше, чем больше радиус рупора по сравнению с длиной волны. Очевидно, что на миллиметровых волнах легче всего осуществить такие рупоры. Целесообразность применения линии с поверхностной волной в миллиметровом диапазоне можно проиллюстрировать следующим примером: на волне $\lambda = 10$ *мм* достаточно слоя диэлектрика толщиной 0,05 *мм*, чтобы осуществить однопроводную линию, в которой затухание меньше, чем в волноводе, в 10 раз.

К достоинствам линий передачи с поверхностной волной относятся также простота конструкции, малая стоимость,

широкая полоса пропускания и большая пропускная мощность. Основной недостаток линий такого вида — резкое увеличение потерь при покрытии водяными каплями, так как эти капли в электромагнитном поле эквивалентны диполям, излучающим электромагнитные волны. Потери еще более возрастают, если влага попадает в рупор.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ГЕНЕРИРОВАНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

3. ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Трудности генерирования колебаний сверхвысоких частот особенно ярко выражены в диапазоне миллиметровых волн.

Ламповый генератор состоит из трех основных элементов: источника постоянного тока, питающего анодную цепь лампы, колебательного контура и электронной лампы, посредством которой энергия источника постоянного тока преобразуется в высокочастотную энергию. При переходе к сверхвысоким частотам свойства электронной лампы и колебательной системы существенно изменяются. Поэтому не случайно, что до сих пор не создан триодный генератор миллиметровых волн.

Нормальная работа электронной лампы затрудняется инерцией электронов, междуэлектродными емкостями и индуктивностями вводов. Инерция электронов приводит к тому, что электроны благодаря своей массе движутся между электродами лампы не мгновенно, а с конечной скоростью. Эта скорость велика, порядка тысяч километров в секунду; тем не менее время пролета электронов в лампе генератора сверхвысоких частот оказывается соизмеримым с периодом колебаний.

Последнее особенно справедливо в применении к миллиметровым волнам. Например, при длине волны $\lambda = 5$ *мм* частота колебаний равна $f = 6 \cdot 10^4$ *Мгц*, а период колебаний $T = 0{,}166 \cdot 10^{-10}$ *сек*.

Если допустить, что на анод лампы подано напряжение $U_а = 100$ *в*, то максимальная скорость электронов, движущихся от катода к аноду, $v_{макс} = 600 \sqrt{U_а} =$

$=6\,000$ *км/сек*, а средняя скорость $v_{ср}=0{,}5v_{макс}=$ $=3\,000$ *км/сек*.

Формула максимальной скорости электронов выражает очевидное положение, что эта скорость тем больше, чем больше анодное напряжение.

Влияние инерции электронов сказывается значительно в том случае, если время пролета электронов в лампе превышает $^1/_4$ периода колебания. Исходя из этого условия, можно сказать, что расстояние между электродами в рассматриваемом случае должно быть не больше $d=0{,}25\,v_{ср}T=0{,}0125$ *мм*.

Такая миниатюрная лампа, если бы и удалось ее изготовить, не допустила бы рассеивания сколько-нибудь значительной мощности на ее электродах, а катод лампы не позволил бы создать требуемый ток эмиссии. В результате генератор был бы весьма маломощным.

Вместе с тем примириться с большой продолжительностью пролета электронов (относительно периода колебаний) нельзя. Это прежде всего вызывает чрезмерные потери колебательной мощности в анодной цепи и еще более в сеточной цепи лампы. В то время как в генераторе низких радиочастот движение электронов к аноду совершается за счет энергии источника питания анодной цепи при весьма незначительном расходе мощности в сеточной цепи, на участке управляющая сетка — катод генератора сверхвысоких частот затрачивается дополнительная мощность. Эта мощность в генераторе миллиметровых волн настолько велика, что может превысить колебательную мощность, выделяемую в анодном контуре, и тогда генерирование колебаний становится невозможным.

Имеются и другие причины, крайне затрудняющие генерирование миллиметровых волн триодами: междуэлектродные емкости и индуктивности вводов такой лампы оказываются больше емкостей и индуктивностей всей колебательной цепи генератора. Кроме того, как уже отмечалось, качество колебательных контуров при переходе к миллиметровым волнам резко ухудшается.

Из всего сказанного следует, что для генерирования миллиметровых волн необходимо прежде всего обезвредить влияние инерции электронов. В качестве колебательных контуров следует использовать объемные резонаторы. Эти принципы положены в основу магнетронных и клистронных генераторов, а также ламп с бегущей и обратной волнами.

4. КЛИСТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Для генерирования непрерывных синусоидальных колебаний миллиметрового диапазона наиболее пригодны клистроны, несмотря на то, что их колебательная мощность очень мала и в большинстве случаев не превышает сотен милливат.

На рис. 13 дан эскиз отражательного клистрона, рассчитанного на генерирование колебаний, соответствующих

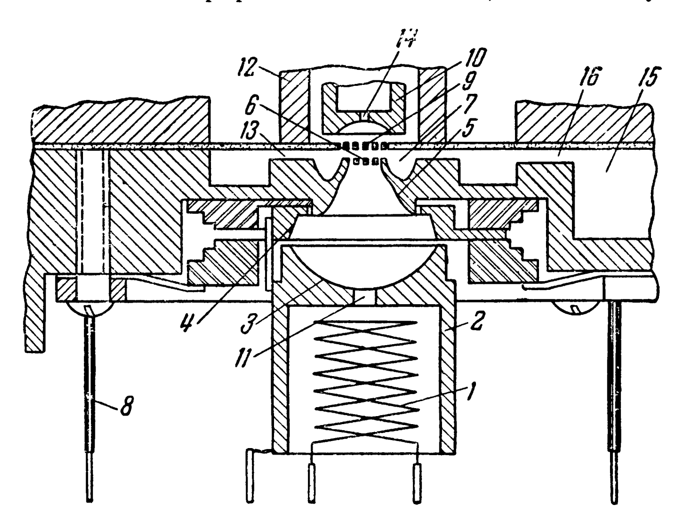


Рис. 13. Эскиз клистрона.

1 — нить накала; *2* — катод; *3* — излучающая поверхность; *4* — фокусирующий электрод; *5* — вытягивающий электрод; *6* — входная сетка; *7* — объемный резонатор; *8* — контакт; *9* — выходная сетка; *10* — отражатель; *11* — отверстие; *12* — элемент настройки; *13* — зазор; *14* — отверстие; *15* — волновод; *16* — трансформаторный переход.

длине волны $\lambda = 5—6$ *мм*. Принцип действия этого клистрона заключается в следующем·

Нить накала *1* нагревает катод *2*. Электроны, излучаемые с оксидированной поверхности *3* катода, направляются фокусирующим электродом *4* и вытягивающим электродом *5* в узкое отверстие, закрытое входной сеткой *6* объемного резонатора *7*. Через контакт *8* к резонатору подводится напряжение +600 *в* (относительно катода). Благодаря этому электроны подходят к сетке *6* со сравнительно большой, почти постоянной скоростью. Если условия самовозбуждения клистрона выполнены, то между входной сеткой *6* и выходной сеткой *9* существует переменное напряже-

ние, которое сообщает электронам, пролетающим резонатор, положительное или отрицательное ускорение. В дальнейшем электроны встречают тормозящее поле отражателя *10*, находящегося под напряжением —150 *в* относительно катода, и начинают двигаться в обратном направлении.

Электроны, получившие в резонаторе положительное ускорение, пролетают в направлении к отражателю большее расстояние, чем электроны, получившие отрицательное ускорение. По этой причине на обратном пути электроны группируются по плотности. При правильном режиме клистрона уплотненные группы электронов встречают в резонаторе при возвращении тормозящее поле (для этого колебательное напряжение должно иметь на сетке *9* положительную полярность, а на сетке *6* — отрицательную). Тогда электроны, теряя скорость, отдают свою кинетическую энергию полю резонатора и, таким образом, энергия источника постоянного тока, питающего резонатор, преобразуется в электромагнитные колебания резонатора.

Заметим, что в клистронном генераторе инерция электронов не только не вредна, но даже принципиально необходима, так как если бы электроны имели бесконечно большую скорость, то не удалось бы их сгруппировать по плотности. Единственный этап работы генератора, на котором сказывается вредное влияние инерции электронов, — пролет электронов через резонатор в прямом направлении, но на этом этапе время пролета электронов удается сократить благодаря тому, что электроны при входе в резонатор имеют большое ускорение, вызванное положительным напряжением на резонаторе.

Как видно из сказанного, по принципу действия отражательные клистроны миллиметровых и сантиметровых волн существенно не отличаются. Что касается конструкции и технологии изготовления, то здесь имеются существенные различия.

Эти различия определяются в первую очередь геометрическими размерами резонатора. Достаточно сказать, что при длине волны генерируемых колебаний $\lambda = 5$ *мм* диаметр резонатора равен 1,7 *мм*; допуск на этот размер не должен превышать 0,003 *мм*. Если сместить верхнюю сетку резонатора относительно нижней на 0,025 *мм*, то частота колебаний генератора изменится на 4 000 *Мгц*.

Так как потери в меди быстро увеличиваются с ростом частоты, то в данном случае они очень велики. Добротность резонатора снижается не только за счет увеличения

потерь от поверхностного эффекта на миллиметровых волнах, но и за счет того, что в этом диапазоне малейшие неровности поверхности оказываются соизмеримыми с длиной волны. В результате дополнительно увеличиваются поверхностное сопротивление и потери. Все эти потери снижают колебательную мощность и к. п. д. клистронного генератора.

При переходе от сантиметровых волн к миллиметровым все размеры электродов клистрона уменьшаются, но не в одинаковой пропорции. Например, если диаметр проволоки сеток уменьшить в такой же мере, как и диаметр резонатора, то проволока сетки получится настолько тонкой, что она быстро перегорит даже при пониженной мощности генератора.

Приходится сетки делать относительно грубыми, в связи с чем снижается эффективность взаимодействия полей резонатора с электронным потоком и как следствие уменьшается мощность и к. п. д. генератора.

Таким образом, имеется много факторов, способствующих снижению энергетических показателей генератора. Поэтому особенно важно увеличить ток эмиссии катода для увеличения электронного потока и соответственно колебательной мощности генератора. Для этого прежде всего необходимо увеличить активную поверхность катода. В рассматриваемом клистроне эффективная поверхность катода повышена за счет того, что излучающая часть катода сделана в виде полусферы *3*, диаметр которой (3,207 *мм*) значительно больше диаметра входной сетки резонатора (0,51 *мм*).

Кроме того, необходимо сконцентрировать излучаемые электроны в пределах этой сетки. Задача разрешается применением двух электродов — фокусирующего *4* и вытягивающего *5*. Последний постепенно сужается в направлении к резонатору. Этим удалось увеличить плотность тока с 340 $ма/см^2$ на катоде до 25 $а/см^2$ на выходе вытягивающего электрода, т. е. в 75 раз.

Катод и фокусирующий электрод изготовляются методом холодного выдавливания, а вытягивающий электрод изготовляется с помощью фасонного резца. Так как в данном случае очень важно обеспечить точность взаимного расположения всех электродов, то центровка производится при наблюдении под микроскопом через специально сделанное отверстие *11* в катоде. Таким способом можно обеспечить точность центровки до 5 *мк*.

В конструкции резонатора должна быть предусмотрена возможность изменения частоты генерируемых колебаний. Настройка осуществляется сжатием верхней стенки резонатора через винт и рычаг, не показанные на рисунке, и через настраивающий элемент *12*. В процессе изготовления элементов настройки возникает затруднение, которое выражается в том, что при малом диаметре применяемого резонатора (1,93 *мм*) нельзя обеспечить нужную гибкость верхней стенки, требуемую для настройки. Возникшее затруднение было устранено применением воздушного зазора *13*, эквивалентного четвертьволновой разомкнутой линии. Входное сопротивление такой линии равно нулю, а поэтому электрически объем резонатора ограничивается диаметром $d=1{,}93$ *мм*, а в механическом отношении верхняя стенка резонатора имеет значительно больший размер.

Важным конструктивным элементом клистрона миллиметрового диапазона волн являются сетки резонатора. Поскольку через эти сетки проходит электронный поток очень большой плотности, необходимо обеспечить хороший теплоотвод от сеток и малую деформацию их. Проволочные сетки в таких условиях оказались непригодными. Их заменили вольфрамовыми лентами, вмонтированными в платиновое кольцо.

Внутренний диаметр кольца входной сетки равен 0,51 *мм*, а выходной сетки 0,762 *мм*.

Отражатель клистрона сделан методом холодного выдавливания. Центровка его, как и катода, производится с помощью микроскопа, который фокусируется на отверстие *14*, предусмотренное в отражателе.

Энергия из резонатора выводится в волновод *15*. Согласование с волноводом производится посредством трансформаторного перехода *16*, размеры которого подбираются экспериментально.

Описанный клистрон генерирует колебания, длина волны которых 5—6 *мм* при выходной мощности 15—30 *мвт*. Ширина полосы электронной настройки 60—180 *Мгц*.

На более длинных волнах миллиметрового диапазона можно получить большую мощность. В последнее время, например, в эксплуатации появились десятиваттные клистроны на волну 8 *мм* с к. п. д. 3,5% и сроком службы 1 000 *ч*.

Разработан также клистронный генератор мощностью 40 *Мвт* на волне $\lambda = 4$ *мм*. В нем применена фокусировка электронного потока электростатическим полем.

Нижним пределом длины волны для клистронов является примерно 2 *мм*; мощность колебаний на этих волнах исчисляется единицами милливатт.

5. МАГНЕТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Магнетронные генераторы, применяемые на миллиметровых волнах, имеют некоторые особенности по сравнению с магнетронами сантиметрового диапазона.

На рис. 14 показан разрез магнетрона, генерирующего колебания длиной волны $\lambda = 6$ *мм*. Магнетрон содержит

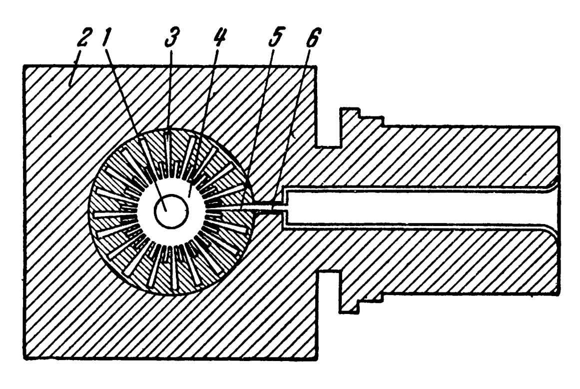


Рис. 14. Поперечный разрез магнетрона миллиметрового диапазона.

1 — катод; *2* — анод; *3* — резонаторы; *4* — пространство взаимодействия; *5* — элемент связи; *6* — щель.

подогревный цилиндрический катод *1*, анодный блок *2*, состоящий из ряда объемных резонаторов *3*, пространства взаимодействия *4*, разделяющего катод и анод, элемента связи *5* и щели *6*, посредством которых энергия генерируемых колебаний отводится от магнетрона.

Кроме того, имеется источник постоянного напряжения, приложенного между анодом и катодом, и постоянный магнит. Полюсы этого магнита примыкают к анодному блоку так, что силовые линии создаваемого им магнитного поля проходят через пространство взаимодействия параллельно образующим катода.

Электроны, излучаемые катодом, в пространстве взаимодействия находятся под воздействием трех полей: постоянного электрического поля, создаваемого источником питания анодной цепи, поля постоянного магнита и пере-

менного электрического поля резонаторов магнетрона. Характер переменного поля резонаторов может быть различным. В многокамерных магнетронах, как правило, применяется такой тип возбуждения, при котором поля соседних резонаторов изменяются в противофазе и тогда их электрические поля имеют вид, показанный на рис. 15.

Если бы существовало только постоянное электрическое поле, то электроны двигались бы с ускорением по радиусу *1* от катода к аноду. Если к постоянному электрическому полю прибавить постоянное магнитное поле, то траектория электронов будет искривляться и они будут совершать петлеобразные движения *2*, каждое из которых будет начинаться и кончаться на катоде. Если же к этим полям прибавить еще электрическое поле резонаторов, то электроны будут совершать возле резонаторов петлеобразные движения *3*, которые завершатся падением электронов на анод.

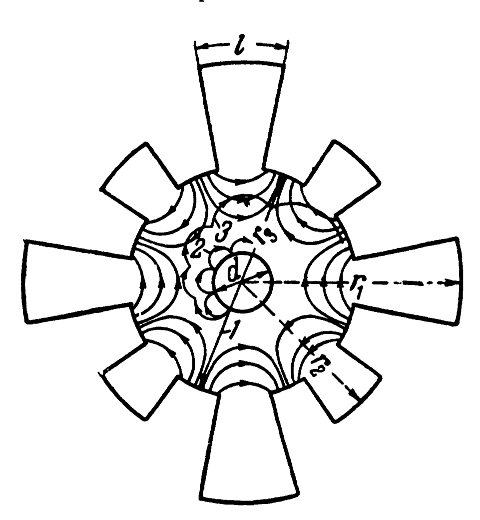


Рис. 15. Траектории движения электронов в магнетроне.

1, *2* и *3* — различные траектории электронов.

При правильном подборе размеров магнетрона и его режима (анодного напряжения, магнитной индукции) каждая петля описывается электронами за полпериода колебаний и на протяжении полюсного шага одного резонатора. При этом электроны частично теряют свою скорость и кинетическую энергию, отдавая ее электрическому полю резонатора. Кинетическая энергия электронов обусловлена источником постоянного тока. Это позволяет сказать, что в магнетронном генераторе, как и в клистронном генераторе, энергия постоянного тока преобразуется в электромагнитную энергию объемных резонаторов, благодаря чему в резонаторах магнетрона поддерживаются незатухающие колебания.

Частота колебаний в магнетроне прежде всего опреде-

ляется геометрическими размерами его колебательной системы. Несмотря на применение объемных резонаторов, размеры элементов магнетрона в данном случае получаются очень малыми. Например, магнетрон, работающий на волне $\lambda=6{,}3$ *мм*, имеет радиус анода $r_3=1{,}22$ *мм*, радиус малого резонатора $r_2=2{,}1$ *мм*, радиус большого резонатора $r_1=2{,}63$ *мм* и толщину лопатки резонатора $l=1{,}08$ *мм*, а в магнетроне, генерирующем колебания с длиной волны $\lambda=3{,}3$ *мм*, размеры резонаторов еще меньше: $r_3=0{,}63$ *мм*, $r_2=1{,}09$ *мм*, $r_1=1{,}43$ *мм* и $l=0{,}05$ *мм*. Очевидно, что изготовление таких магнетронов требует очень высокой точности (меньше 25 *мк*) и связано с большими трудностями технологического порядка.

Из-за малых размеров резонаторов нельзя получить большую колебательную мощность. В целях ее повышения увеличивают число резонаторов, но это усложняет поле в пространстве взаимодействия и создает опасность возбуждения магнетрона на другой частоте, при другом виде волн. Вид колебаний может быть, скажем, не противофазный, а какой-то иной, когда фаза электромагнитных полей соседних резонаторов сдвинута на угол, не равный 180°.

Для повышения устойчивости основного вида колебаний применяют связки или разнорезонаторные системы. Связки представляют собой короткие провода, соединяющие соответствующие резонаторы с их торцевой стороны. Так как каждый резонатор магнетрона эквивалентен колебательному контуру, то колебательная система магнетрона имеет несколько резонансных частот. С помощью связок усиливается связь между резонаторами, а это, как известно, приводит к отодвиганию одной резонансной частоты от другой. Если одна из этих частот является основной и на ней возбуждается магнетрон, то благодаря отодвиганию ближайших резонансных частот уменьшается опасность генерирования колебаний другой частоты и другого вида волны.

В диапазоне миллиметровых волн применение связок нежелательно, так как из-за малых размеров магнетрона их трудно осуществить, а тем более регулировать. К тому же связки создают дополнительные потери и снижают добротность колебательной системы.

В магнетронных генераторах миллиметровых волн больший эффект дает применение разнорезонаторных систем. Для них характерно то, что два соседних резонатора имеют различные размеры, а иногда и различный профиль.

Этим колебательная система делится на две половины с разными резонансными частотами. Магнетрон возбуждается на какой-то промежуточной частоте. Очевидно, что чем больше отличаются соседние резонаторы и их резонансные частоты, тем меньше опасность возбуждения магнетрона на волне, не равной основной. Число резонаторов в такой системе достигает 30.

На сантиметровых волнах наиболее широко применяются резонаторы, каждый из которых имеет форму плоской щели с примыкающим к ней цилиндром. Такие резонаторы непригодны для магнетронов миллиметровых волн, так как щель в них получается очень узкой и это дополнительно ограничивает мощность генерируемых колебаний. В магнетронах миллиметрового диапазона волн используются резонаторы лопаточного вида, как показано на рис. 15.

Рассмотрим другие факторы, ограничивающие мощность и частоту колебаний магнетрона.

Поскольку анодный блок магнетрона имеет малые размеры, то тем более мал диаметр катода. Например, в упомянутых магнетронах диаметр катода $d = 1{,}58$ *мм* в случае $\lambda = 6{,}3$ *мм* и $d = 0{,}813$ *мм* в случае $\lambda = 3{,}3$ *мм*. В связи с этим ток эмиссии катода даже при форсировании его теплового режима не может быть достаточно большим. Для увеличения мощности и частоты колебаний магнетрона остается увеличить анодное напряжение, но и здесь имеются ограничения, обусловленные опасностью пробоя между электродами. Анодное напряжение и ток эмиссии катода могут быть намного увеличены только в случае работы магнетрона в импульсном режиме.

При переходе от сантиметровых волн к миллиметровым необходимо еще больше повысить магнитную индукцию в пространстве взаимодействия. Из рис. 15 видно, что с уменьшением длины волны генерируемых колебаний полюсный шаг резонаторов уменьшается, следовательно, радиус кривизны траектории электронов должен быть уменьшен, а для этого необходимо повысить магнитную индукцию. В то время как в магнетронных генераторах сантиметровых волн магнитная индукция В = 2 000—7 000 *гс*, в магнетронах миллиметрового диапазона она достигает величины 5 000—15 000 *гс*, а для устойчивой работы магнетрона на волне $\lambda = 2{,}5$ *мм* требуется магнитная индукция, превышающая 25 000 *гс*. Отсутствие магнита, способного создать такое поле, является основной причиной того, что нижний предел длины волны колебаний, ста-

бильно генерируемых магнетроном, примерно равен 3 *мм*. Импульсная мощность при этом исчисляется единицами киловатт, а к. п. д. — несколькими процентами. С повышением длины волны до 8 *мм* можно получить импульсную мощность в несколько десятков киловатт при к. п. д. 20—25%.

Колебания магнетрона имеют импульсный характер, поэтому они содержат составляющие не только основной частоты, но и ее гармоник. На рис. 16 показана блок-схема установки для выделения гармоник магнетрона, с помощью чего можно понизить длину волны колебания.

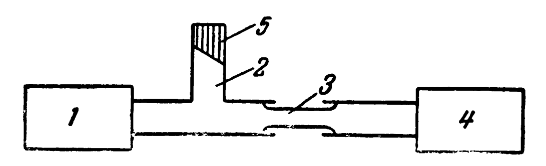


Рис. 16. Блок-схема установки для выделения гармоник колебаний магнетрона.
1—магнетрон; *2*—Т-образное разветвление; *3*—раздвижная секция; *4*—фильтр; *5*—поглощающая нагрузка.

За магнетроном *1* следует Т-образное волноводное разветвление *2*, раздвижная секция *3* и фильтр *4*. В боковом плече Т-образного разветвления имеется поглощающая нагрузка *5*. Раздвижная секция представляет собой волновод, поперечное сечение которого настолько меньше сечения Т-образного перехода, что волны основной частоты через него пройти не могут, они отражаются от секции *3* и поглощаются в нагрузке *5*. Секция *3* сделана раздвижной для того, чтобы можно было изменять нагрузку магнетрона с целью создания в нем режима, наиболее благоприятного для получения требуемой гармоники. Фильтр *4*, так же как элементы *2* и *3*, представляет собой волновод. Его поперечное сечение подобрано с расчетом беспрепятственного прохождения выделяемой гармоники и подавления всех остальных гармоник.

В установке такого рода были получены электромагнитные волны с $\lambda = 1{,}1$ *мм*, являющиеся третьей гармоникой колебаний магнетрона $\lambda = 3{,}3$ *мм*.

6. ЛАМПЫ С БЕГУЩЕЙ И ОБРАТНОЙ ВОЛНОЙ

Лампа с бегущей волной. Лампы с бегущей и обратной волной могут принципиально работать как в режиме усиления, так и в режиме автогенерации (самовозбуждения).

На практике, как правило, лампы с бегущей волной используются в качестве усилителей, а лампы с обратной волной — в качестве автогенераторов.

Принцип действия лампы с бегущей волной (рис. 17) заключается в следующем.

Источник накала *1* питает нить *2*, которая подогревает катод *3*. Излучаемые катодом электроны попадают в электрическое поле анода *4*, создаваемое положительным напряжением U_a источника питания *5*. Под влиянием приложенного продольного магнитного поля электроны летят

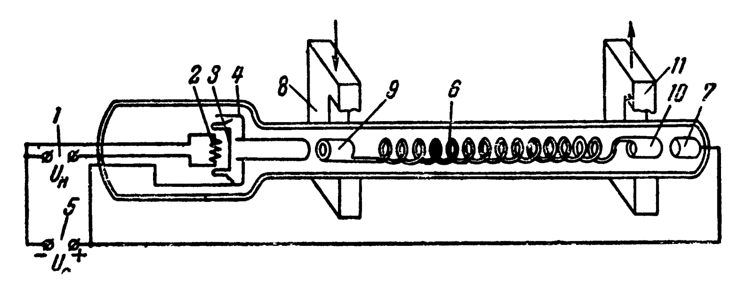


Рис. 17. Эскиз лампы с бегущей волной.

1 — источник канала; *2* — нить накала; *3* — катод; *4* — анод; *5* — источник питания анода; *6* — спираль; *7* — коллектор; *8* — волновод; *9* и *10* — вибраторы; *11* — выходной волновод.

в узком пучке. Магнитное поле может быть создано катушкой, охватывающей баллон лампы, или постоянным магнитом, полюсы которого примыкают к торцам лампы. Электронный пучок проходит внутри металлической спирали *6* к коллектору *7*. Коллектор (вне лампы) соединяется с анодом, а потому электроны движутся внутри спирали со средней скоростью, зависящей от напряжения U_a.

Одновременно происходит другой процесс. Электромагнитные колебания, подводимые по волноводу *8*, индуктируют э. д. с. в вибраторе *9*, с которого начинается спираль. Тем самым в лампе возбуждаются бегущие волны. Как известно, электромагнитная энергия высокочастотных колебаний передается через диэлектрик или вакуум, а провода служат лишь каналом, вдоль которого распространяются волны. Следовательно, в лампе с бегущей волной спираль заставляет электромагнитные волны распространяться вдоль нее, благодаря чему продольная скорость распространения этих волн вдоль оси лампы во столько раз уменьшается по сравнению со скоростью света, во

сколько раз длина спирали больше ее шага. Если, допустим, это отношение равно десяти, то продольная скорость распространения электромагнитных волн в лампе будет $V = 3 \cdot 10^4$ *км/сек.*

Полученное «замедление» электромагнитной волны позволяет сообщить электронам такую же поступательную скорость, как и волнам. Для этого анодное напряжение должно быть $U_а \approx 2\,500$ *в*, что вполне осуществимо.

Как только электроны выходят из электронного прожектора, так сразу же они оказываются под действием электрического поля бегущей волны. Поле на одном участке ускоряет электроны, а на другом — замедляет их. В результате ускоренные электроны нагоняют заторможенные и происходит концентрация электронов. Уплотненные группы электронов движутся на равных интервалах и взаимодействуют с электромагнитной волной. Там, где электроны ускоряются, энергия бегущей волны уменьшается, а там где электроны тормозятся, энергия бегущей волны увеличивается. В среднем вторая часть процесса происходит интенсивнее, чем первая, а поэтому по мере движения волны амплитуда колебаний волны, за счет кинетической энергии электронов, полученной от источника постоянного тока, все более возрастает. Это усиление весьма значительно, так как в данном случае колебания электронов и бегущей волны происходят в фазе на протяжении всей спирали.

Усиленные колебания, достигнув конца спирали, с помощью вибратора *10* возбуждают выходной волновод *11*. Если соединить между собой волноводы *11* и *8* таким образом, чтобы колебания, поступающие из выходного волновода во входной, совпадали по фазе с имеющимися в волноводе *8* колебаниями и имели достаточную мощность, то произойдет генерирование незатухающих колебаний.

Частота этих колебаний зависит от геометрических размеров системы. В генераторах миллиметровых волн размеры всех элементов очень малы. Особенно миниатюрной должна быть спираль. Поэтому ее очень трудно изготовить и она получается весьма непрочной.

Для работы в миллиметровом диапазоне более пригодна лампа, в которой спираль заменена металлической гребенкой (рис. 18). В гребенке *1* имеются отверстия, через которые от катода *2* к коллектору *3* проходит поток электронов. Вместе с тем в лампе имеется бегущая волна *4*, которая свободно проникает между выступами гребенки. В таких условиях не требуется чрезмерного ускорения элек-

тронов, чтобы они эффективно взаимодействовали с бегущей волной.

Допустим, что в сечении *А* электроны встретили максимальное торможение со стороны бегущей волны. Для правильной работы нужно, чтобы те же электроны в соседней щели *Б* также были заторможены, т. е. чтобы они встретили электромагнитную волну в той же фазе. Для этого не

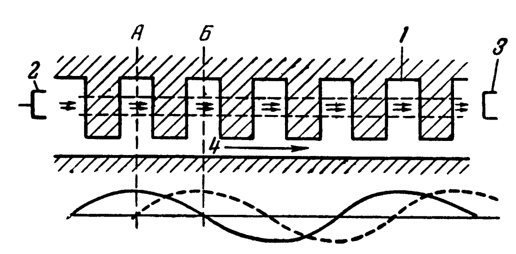


Рис. 18. Принцип действия лампы с бегущей волной, в которой используется пространственная гармоника.

1 — гребенка; *2* — катод; *3* — коллектор; *4* — направление движения волны.

обязательно соблюдать равенство расстояний, пройденных электромагнитной волной и электронами: поскольку через каждую длину волны фаза ее повторяется, бегущая волна может пройти расстояние, большее, чем электроны, на ве-

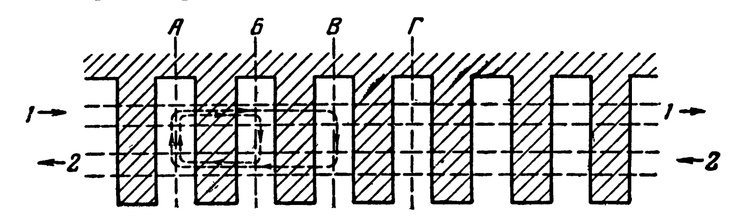


Рис. 19. Взаимодействие потока электронов и электромагнитных полей в генераторе с обратной волной.

1 — поток электронов; *2* — электромагнитная волна

личину λ, 2λ, $3\lambda\ldots$, т. е. $AB + \lambda$, $АБ + 2\lambda$, $АБ + 3\lambda\ldots$ В таких случаях говорят, что электроны взаимодействуют с одной из пространственных гармоник электромагнитной волны.

Лампа с обратной волной. В описываемой конструкции возможно и встречное движение потока электронов *1* и электромагнитной волны *2* (рис. 19). В этой так называе-

мой лампе с обратной волной за время движения электронов от щели *А* к соседней щели *Б* электромагнитная волна, так же как раньше, должна пройти такое расстояние, чтобы электрон в щели *Б* встретил такую же фазу волны, как и в щели *А*.

В лампе с обратной волной требуется несколько большее напряжение для ускорения электронов, чем в лампе с бегущей волной.

Тем не менее лампа с обратной волной более перспективна для генерирования миллиметровых волн благодаря тому, что в ней не требуется внешняя обратная связь. Эта связь создается благодаря противоположному движению волны и электронов. Наиболее короткая цепь обратной связи создается между соседними щелями *А* и *Б*. Более длинная цепь охватывает щели *А* и *В*, еще более длинная цепь между щелями *А* и *Г* и т. д. Если выполняются необходимые фазовые соотношения, т. е. колебания, поступающие за счет обратной связи, совпадают по фазе с исходными, то становится возможным самовозбуждение генератора.

С изменением напряжения на аноде электронного прожектора изменяются средняя скорость электронов и время, необходимое для пролета электронов от одной щели к другой. Соответственно должна измениться длина волны, чтобы обратная связь по-прежнему была положительной. К примеру, для изменения длины волны от 7,5 до 6 *мм* ускоряющее напряжение следует изменить от 1 600 до 4 000 *в*. Таким образом, имеется возможность весьма просто регулировать частоту генерируемых колебаний в больших пределах. Это преимущество ламп с обратной волной особенно существенно при генерировании миллиметровых волн, так как при очень малых размерах механические регулировки в ней крайне затруднительны, а иногда и невозможны.

Для работы в миллиметровом диапазоне более пригодным оказался генератор несколько иной конструкции, в котором электромагнитная волна распространяется между стержнями, смонтированными внутри волновода (рис. 20).

Этот волновод сделан из меди и состоит из двух разъемных частей. Стержни изготовлены из позолоченной молибденовой проволоки диаметром 0,05 *мм* и имеют форму шпилек. Концы шпилек приваривают к соответствующим стенкам разъемных частей волновода. Расстояние между осями шпилек в месте их прикрепления равно

0,245 *мм*. При сборке волновода стержни одной группы чередуются со стержнями другой группы, расстояние между осями соседних шпилек равно 0,127 *мм*. Если из этого расстояния еще вычесть диаметр стержня, то станет понятным, как близки стержни друг к другу и как трудно обеспечить правильность их взаимного расположения. Контроль правильности сборки производится под микроскопом.

Работа генератора заключается в следующем. Поток электронов *1* направляется вдоль оси волновода и имеет в поперечном сечении диаметр 0,76 *мм*. Шпильки заставля-

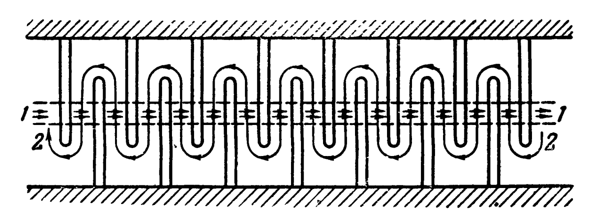


Рис. 20. Взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной в лампе, содержащей волновод со стержнями.

1 — направление движения электронов; *2* — направление движения волны.

ют электромагнитные волны *2* двигаться в зазоре между ними. Такую конструкцию можно представить себе как зигзагообразный волновод. При пересечении электронов с электромагнитной волной они взаимодействуют. Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы взаимодействие происходило при одинаковой фазе обратной волны, а для этого каждой скорости электронного потока должна соответствовать вполне определенная фазовая скорость электромагнитной волны. Последняя при данных поперечных размерах и профиле волновода зависит только от частоты распространяемых в нем волн. Отсюда следует вывод, что с изменением напряжения, определяющего среднюю скорость электронов, должна изменяться длина волны генерируемых колебаний.

Данный генератор по опубликованным в зарубежной печати данным отличается очень широким диапазоном электронной настройки — от $\lambda=4{,}75$ *мм* до $\lambda=7$ *мм*. При этом напряжение на аноде электронного прожектора должно изменяться от 500 до 2 500 *в*. Магнитное поле, направляющее поток электронов по оси волновода, однородно и имеет напряженность 2 000 *гс*.

Колебательная мощность описанных генераторов с обратной волной находится в пределах 2—25 *мвт*.

В результате дальнейших усовершенствований генераторов с обратной волной была разработана замедляющая система в виде встречных штырей (рис. 21). Каждый штырь такой системы является выступом массивного основания, а поэтому система отличается механической прочностью и рассчитана на большую мощность рассеивания. Вместе с тем изготовление замедляющего устройства сравнительно несложно—оно производится фрезерованием мед-

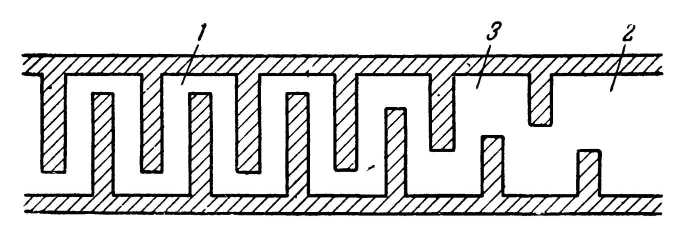


Рис. 21. Согласование замедляющей системы с волноводом в генераторе с обратной волной.

1 — пространство взаимодействия; *2* — волновод; *3* — переходный участок.

ного бруска, и при этом возможна высокая точность обработки.

Для того чтобы при переходе от пространства взаимодействия *1* к волноводу *2* генерируемые волны не отражались, эти элементы согласуются путем постепенного увеличения поперечного сечения канала связи *3*. Тем самым выходное сопротивление замедляющей системы плавно преобразуется во входное сопротивление волновода.

Наряду с изменением конструкции замедляющего устройства были приняты меры по увеличению колебательной мощности генератора путем увеличения плотности тока в электронном пучке. Это достигнуто применением электронных пушек с параллельным или сходящимся электронным пучком, который ускоряется напряжением от 700—1 000 *в* до 2—5 *кв* и направляется продольным магнитным полем большой напряженности. Таким способом были получены электронные пучки, имеющие поперечный размер от 0,1 до 0,4 *мм* при плотности тока от 1 до 20—40 *а/см*^{2}.

Наиболее современные генераторы с обратной волной при $\lambda = 1{,}25$ *мм* отдают мощность 50—150 *мвт*, а на $\lambda =$ $= 3$ *мм* их колебательная мощность составляет от 0,2 до

25 *мвт*. Если ограничиться узкополосной перестройкой частоты, то на волнах 6,5 и 8,5 *мм* можно увеличить мощность до 5—6 *вт*.

Теперь отметим преимущества ламп с бегущей и обратной волной. В этих лампах, как и в магнетронах, взаимодействие электронов с электромагнитной волной происходит эффективно на длительном пути движения волны в лампе, тогда как в клистронах указанное взаимодействие имеет место только во время пролета электронов между сетками резонатора. В результате получается увеличение колебательной мощности и к. п. д. Лампы с бегущей и обратной волной выгодно отличаются от клистронов и магнетронов широкими возможностями электронной настройки благодаря отсутствию резонансных элементов и наличию режима бегущих волн.

7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Наиболее короткие волны миллиметрового диапазона можно генерировать с помощью полупроводниковых умножителей частоты. Работа их основана на односторонней проводимости полупроводниковых диодов. Благодаря этому синусоидальное напряжение, приложенное к диоду, вызывает в нем ток в форме импульсов. Полученные импульсы являются суммой ряда синусоидальных токов основной частоты и ее гармоник. Для выделения одной из высших гармоник остается отфильтровать все остальные составляющие токи.

Такое устройство позволяет использовать в качестве первичного источника колебаний генератор более длинных волн и все измерения частоты производить в его цепях, поскольку коэффициент умножения частоты известен.

Рис. 22 иллюстрирует процесс умножения частоты с помощью полупроводникового диода. Первичный источник колебаний посредством фланца *1* подключается к входному волноводу *2*, рассчитанному на пропускание колебаний основной частоты. Проходящая по волноводу волна возбуждает приемный штырь *3*, от которого колебания передаются в полупроводниковый диод, помещенный в патрон *4*. Интенсивность поля в месте расположения штыря и э. д. с., индуктируемая в нем, могут быть изменены настроечным винтом *5* и регулировкой глубины погружения штыря. Настройка производится с целью получения максимальной мощности требуемой гармоники.

В дальнейшем электромагнитные колебания проходят согласующий волновод *6* и выходной волновод *7*. Все три волновода различаются по размерам поперечного сечения. Наименьшее сечение имеет выходной волновод, так как он рассчитан на пропускание выделяемой гармоники и подавление всех остальных (в первую очередь колебаний основной частоты). Длину выходного волновода делают минимальной, имея в виду, что очень малое поперечное сечение волновода и очень высокая частота колебаний в нем могут явиться причиной чрезмерных потерь энергии. Переход от

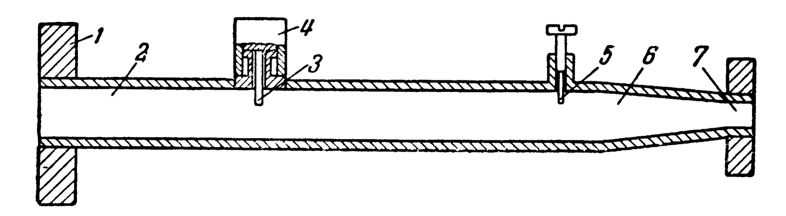


Рис. 22. Эскиз полупроводникового умножителя частоты.
1 — фланец; *2* — волновод; *3* — приемный штырь; *4* — патрон; *5* — настроечный винт; *6* — согласующий волновод; *7* — выходной волновод.

входного волновода к выходному совершается плавным изменением поперечного сечения. Если бы не было согласующего волновода, то в месте сочленения с выходным волноводом возникли бы нежелательные отражения электромагнитных волн.

Другая, более сложная конструкция умножителя частоты представлена на рис. 23,*а*. Основными элементами конструкции являются входной прямоугольный волновод *1*, выходной прямоугольный волновод *2* и отрезок коаксиальной линии *3*, который с одной стороны кончается кристаллодержателем *4*, а с другой стороны кабельным разъемом *5* для подключения цепи, контролирующей мощность основной частоты. Оба волновода и отрезок линии расположены взаимно-перпендикулярно.

Полупроводниковый диод помещается в коаксиальном патроне (рис. 23,*б*), внутренний провод *6* которого соединяется с контактной пружиной, а внешний провод *7* — с кристаллом диода. Между проводами патрона находится изолирующая шайба *8*.

Исходные колебания, поступающие в волновод *1* со стороны фланца *9*, возбуждают э. д. с. во внутреннем проводе коаксиальной линии. Благодаря этому основная часть

поступившей энергии проходит в полупроводниковый диод, а некоторая ее часть ответвляется к разъему *5*. В диоде происходит детектирование колебаний; возникает много гармонических составляющих. Одна из этих составляющих, на которую рассчитан выходной волновод *2*, проходит через него в нагрузку. Для того чтобы не допустить колеба-

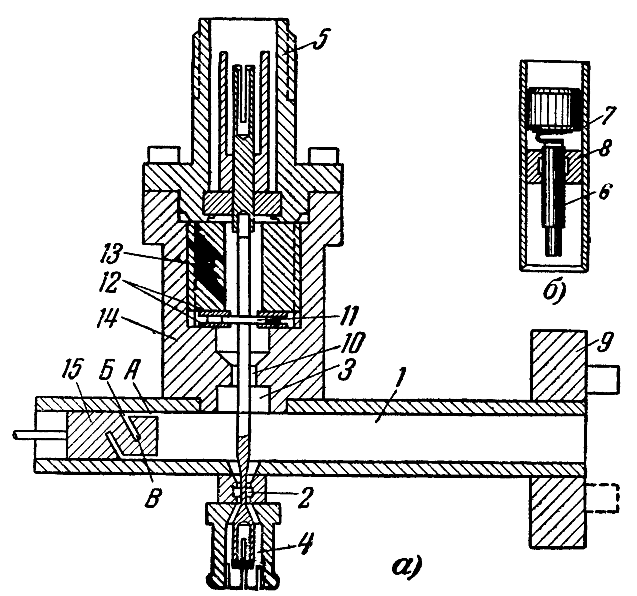


Рис. 23. Полупроводниковый умножитель частоты.

а — конструкция; *б* — патрон полупроводникового диода *1* — входной волновод; *2* — выходной волновод; *3* — отрезок коаксиальной линии; *4* — кристаллодержатель, *5* — кабельный разъем; *6* — внутренний контакт; *7* — внешний контакт; *8* — изолирующая шайба; *9* — фланец; *10* — фильтр; *11* — утолщение провода; *12* — слюдяные прокладки; *13* и *14* — детали внешнего провода; *15* — поршень.

ния выделяемой гармоники в измерительную цепь и ограничить мощность основной частоты, в этой цепи предусмотрен фильтр *10*.

Поперечные размеры коаксиальной линии на различных ее участках различны: они минимальны там, где линия пересекает выходной волновод, и максимальны там, где линия переходит в разъем. В связи с этим приходится принимать особые меры для жесткой фиксации проводов линии. В частности, внутренний провод на участке *11* утолщен и зажат через слюдяные прокладки *12* между деталями *13* и *14* внешнего провода.

Настройка смесителя производится поршнем *15* входного волновода, аналогичным поршнем выходного волновода и перемещением диода вдоль коаксиальной линии. Последнее возможно благодаря наличию надежного скользящего контакта между проводами линии и патроном диода. В закорачивающем поршне волновода имеются канавки, каждая из которых представляет собой полуволновую линию *АБВ*, замкнутую накоротко в *В* и состоящую из двух четвертьволновых участков *АБ* и *БВ*. Так как входное сопротивление полуволновой линии *АБВ* равно нулю, то независимо от качества контакта *Б* между поршнем и волноводом в сечении *А* получается короткое замыкание. Вместе с тем, поскольку в сечении *Б* находится узел тока, несовершенство этого контакта не вызывает потерь энергии.

Основным требованием, предъявляемым к полупроводниковым умножителям частоты, является получение максимальной мощности на выходе умножителя. Выходная мощность умножителя зависит от качества первичного источника колебаний, от его мощности и частоты, от качества кристалла, от режима работы кристалла и от потерь в элементах устройства.

В качестве первичного источника колебаний обычно используют отражательные клистроны, так как они в сравнении, например, с магнетроном отличаются чисто синусоидальным характером генерируемых колебаний и возможностью плавной регулировки частоты (на 15% — механическим способом и 0,1% — электрическим способом).

Наиболее употребительны полупроводниковые диоды, состоящие из кристалла кремния или германия и платиновой или вольфрамовой проволоки. Коэффициент умножения частоты в большинстве случаев равен двум или трем и редко достигает пяти. Умножение с большим коэффициентом малоэффективно, так как мощность гармоник, как правило, значительно уменьшается с увеличением их номера.

На вход умножителя частоты должно быть подано не менее 25 *мвт*. Вместе с тем увеличивать входную мощность свыше 100 *мвт* нецелесообразно: это приводит сначала к замедлению роста, а в дальнейшем и к спаду выходной мощности.

Соотношение между амплитудами колебаний основной частоты и ее гармоник в импульсе тока диода таковы, что мощность в процессе умножения снижается по крайней мере в десятки раз. Например, при наличии клистронов, гене-

рирующих колебания, длина волны которых достигает 5 *мм* при мощности свыше 25 *мвт*, на выходе полупроводниковых умножителей частоты получаются волны длиной 2 *мм* при мощности, исчисляемой единицами микроватт. В настоящее время таким способом уже получены устойчивые колебания, соответствующие длине волны менее 1 *мм*, но мощность их ничтожно мала.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

АНТЕННЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

8. АНТЕННЫ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Антенны миллиметровых волн не отличаются существенно от антенн сантиметрового диапазона. Это не случайно: и на том и на другом диапазоне длина волны мала по сравнению с линейными размерами антенны, благодаря чему в обоих случаях имеется возможность использовать излучающие и принимающие системы, подобные оптическим.

На миллиметровых волнах особенно широко используются рупорные, рефлекторные и линзовые антенны.

Рупорные антенны являются продолжением волновода, который другим концом соединяется с передатчиком или приемником. Рефлекторные антенны представляют собой отражатель в форме параболоида вращения или параболического цилиндра, в фокусе которого помещен облучатель. Линзовые антенны обычно содержат линзу в виде металлических пластин (трубок), расположенных таким образом, чтобы время прохождения волн через линзу в различных направлениях было неодинаковым. В результате сферические или цилиндрические волны, исходящие от облучателя, помещенного в фокусе или на фокальной линии линзы, преобразуются ею, так же как рупором и отражателем, в плоские волны.

В сферических и цилиндрических волнах фронт волны представляет собой соответственно сферу и цилиндр, в связи с чем лучи в них расходятся под различными углами, а в плоских волнах фронт волны имеет вид плоскости и лучи в них почти параллельны друг другу. Таким образом, ненаправленные волны становятся направленными.

Направленность антенн такого вида тем выше, чем больше размер их раскрыва по сравнению с длиной волны

и чем больше фронт волны приближается к плоскому. На миллиметровых волнах длина волны настолько мала, что можно, не применяя громоздких антенн, получить диаграмму направленности, ширина которой исчисляется десятыми долями градуса.

В тех случаях, когда не требуется высокой направленности, как, например, при облучении отражателя (линзы) из фокуса или в лабораторных установках, целесообразно использовать небольшие рупоры. Если же требуется высокая направленность, то наиболее пригодны параболические антенны. Если же наряду с высокой направленностью производится сканирование (т. е. пространственное развертывание) луча в большом угле и с большой скоростью, то широко используются линзовые антенны.

Характерной для миллиметрового диапазона волн является антенна радиолокационной станции, установленная в Лондонском аэропорту для наблюдения за движением самолетов, автомашин и даже людей на территории аэропорта.

На рис. 24 показана описываемая антенна. Она состоит из двух параболических цилиндров *1* и *2*, в фокусе которых находятся рупорные облучатели *3* и *4*, соединенные через волноводы *5* и *6* с блоком приемопередатчика *7*. При передаче используются отражатель *1*, рупор *3* и волновод *5*, а во время приема — отражатель *2*, рупор *4* и волновод *6*. Ширина раскрыва отражателя равна 1,8 *м*, что при длине волны $\lambda = 8$ *мм* позволило получить диаграмму направленности, имеющую в горизонтальной плоскости ширину в 23′.

Вертикальный размер каждого рефлектора значительно меньше и соответственно ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости намного больше (14°), что ускоряет обзор пространства.

Благодаря большой ширине луча в вертикальной плоскости за один оборот антенны облучается вся территория аэропорта. Тем самым создана возможность применения наиболее простой и вместе с тем наиболее быстрой системы обзора пространства — круговой. Скорость вращения антенны 20—24 *об/мин*. Наличие двух антенн (приемной и передающей) позволило освободиться от антенного переключателя и связанных с ним потерь. К преимуществам конструкции относятся также неподвижное соединение антенны с блоком приемопередатчика и связанные с этим сокращение длины волноводов и потери энергии в них.

Вся высокочастотная система может вращаться относительно литого основания *8*, внутри которого находятся электродвигатель, редуктор, контактные кольца для питания и управления высокочастотным блоком и трансформаторы промежуточной частоты для связи с остальными кас-

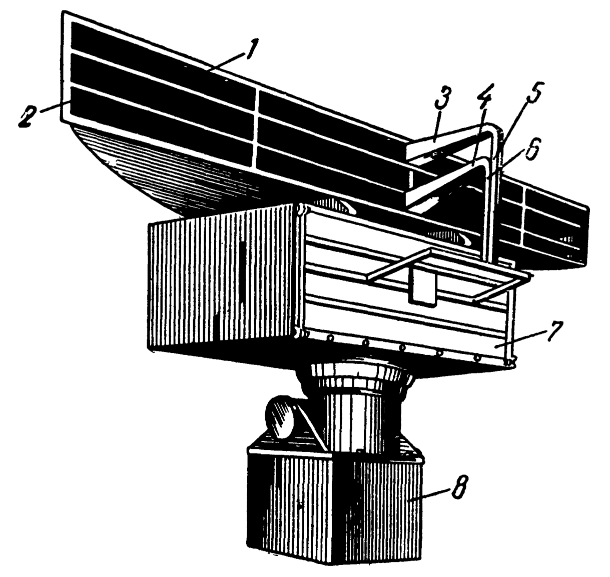


Рис. 24. Антенна радиолокационной станции 8-*мм* диапазона.

1 и *2* — параболические цилиндры; *3* и *4* — рупорные облучатели; *5* и *6* — волноводы; *7* — передатчик; *8* — литое основание

кадами приемника, смонтированными вместе с индикатором. Все это устройство установлено на крыше диспетчерской вышки.

9. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Радиоволны миллиметрового диапазона, занимая промежуточное положение между сантиметровыми и инфракрасными волнами, в большей мере, чем сантиметровые и более длинные волны, подвергаются поглощению и рассеянию в атмосфере. Поглощение происходит как в газах, так и в каплях воды, содержащихся в атмосфере.

Как известно, воздух представляет собой смесь газов, среди которых основными являются азот, кислород и пары

воды. Молекулы азота не обладают заметными электрическим и магнитным дипольными моментами, а поэтому они не взаимодействуют с электромагнитными волнами и не вносят в них затухания. Молекулы водяного пара эквивалентны электрическим диполям. В таких диполях под влиянием электромагнитных волн возникают колебания. Интенсивность этих колебаний зависит от частоты. В частности, на волне $\lambda = 1{,}33$ *см* имеет место резонанс. При резонансе электрические колебания молекул водяного пара совершаются особенно интенсивно, в результате чего резко увеличивается поглощение энергии, переносимой электромагнитными волнами. Поглощение сказывается тем больше, чем больше влажность атмосферы.

Еще более интенсивное затухание вносится при резонансе кислородом воздуха. Этот резонанс происходит на волнах $\lambda = 0{,}5$ *см*, 0,25 *см* и 0,17 *см*. В данном случае поглощение радиоволн обусловлено тем, что молекулы кислорода обладают свойствами магнитного диполя и взаимодействуют с магнитным полем волн. Затухание по мере увеличения высоты уменьшается вследствие понижения плотности газов.

Если в атмосфере имеются капли воды, то они вызывают рассеивание радиоволн. Рассеивание проявляется тем больше, чем больше размеры капель воды по сравнению с длиной волны. Следовательно, на миллиметровых волнах рассеивание радиоволн должно быть более ощутимо, чем в более длинноволновой части радиотехнического диапазона. Особенно существенно влияние осадков, когда они велики, например при наличии дождей.

Радиоволны миллиметрового диапазона не только рассеиваются каплями воды, но и поглощаются ими. Поглощение объясняется тем, что вода не является идеальным диэлектриком и обладает сравнительно высокой проводимостью. Электромагнитные волны, вызывая в воде токи проводимости, частично теряют свою энергию. Эти потери увеличиваются с ростом частоты электромагнитных колебаний. Следовательно, при переходе к миллиметровым волнам усиливается не только рассеяние, но и поглощение электромагнитной энергии в каплях воды.

На миллиметровых волнах, как и в остальной части диапазона сверхвысоких частот, распространение электромагнитных волн происходит без участия ионосферы, так как последняя на сверхвысоких частотах не обладает сколько-нибудь значительной проводимостью и не

преломляет радиоволны. В миллиметровом диапазоне не происходит также дифракции радиоволн: радиоволны не огибают неровностей земной поверхности вследствие того, что длина волны слишком мала по сравнению с размерами этих неровностей.

Таким образом, в данном случае радиосвязь возможна при наличии прямой видимости или на несколько большем расстоянии, вследствие некоторого искривления лучей радиоволн в нижних слоях атмосферы. Это явление, называемое атмосферной рефракцией, происходит благодаря некоторому преломлению электромагнитных волн, обуслов-

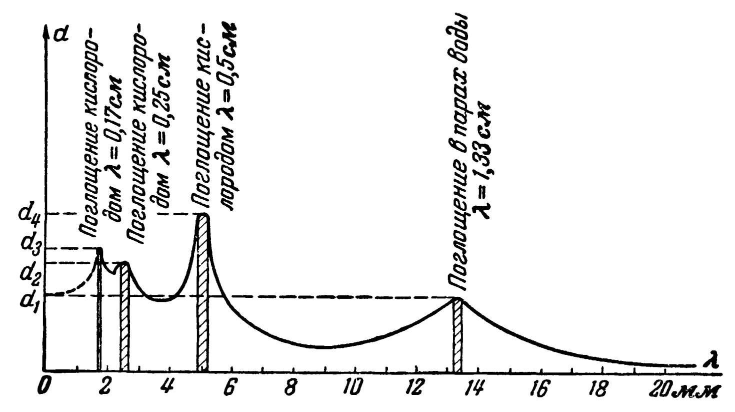


Рис. 25. Зависимость затухания электромагнитных волн от длины волны.

ленному изменением плотности воздуха, влажности и температуры нижних слоев атмосферы с высотой.

Если на большей части диапазона с. в. ч. дальность связи в основном ограничивается отсутствием отражения от ионосферы и дифракции, то на миллиметровых волнах дальность связи к тому же ограничивается за счет дополнительного фактора — большого затухания в атмосфере.

На рис. 25 показана зависимость затухания d радиоволн в свободном пространстве от длины волны. Как видно из этого рисунка, затухание в атмосфере на миллиметровых волнах значительно больше, чем на сантиметровых волнах, и особенно велико при резонансном поглощении кислородом и парами воды (при $\lambda = 0{,}17$ *см* $d = 28$ *дб/км*, при $\lambda = 0{,}25$ *см* $d = 3$ *дб/км*, при $\lambda = 0{,}5$ *см* $d = 14{,}7$ *дб/км* и при $\lambda = 1{,}33$ *см* $d = 0{,}16$ *дб/км*).

Частоты резонанса для практического применения совершенно непригодны. На практике используются только те участки миллиметрового диапазона, на которых затухание минимально. Это в первую очередь относится к волнам 8—9 *мм,* во вторую очередь — к волнам 3—4,5 *мм.*

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИЕМ И УСИЛЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

10. ОСОБЕННОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Радиоприемные устройства миллиметровых волн выполняются по схеме прямого усиления или супергетеродинной схеме. В приемниках прямого усиления, работающих на волнах от 2 до 10 *мм,* применяются полупроводниковые детекторы, а на более коротких волнах — инфракрасные детекторы.

Для детектирования миллиметровых волн пригодны те же кристаллы, что и для умножения частоты. Наиболее употребительны детекторные пары в виде вольфрамовой проволоки и кристалла кремния с небольшой примесью алюминия.

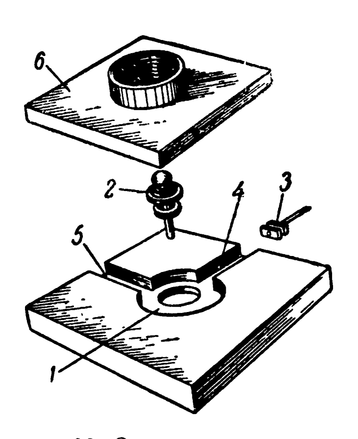


Рис. 26. Основные детали камеры детектора миллиметровых волн.

1 —объемный резонатор; *2*—диск; *3* — поршень, *4* — канал, *5* — канал связи; *6* — крышка.

В аппаратуре сантиметровых волн детекторные пары помещают в керамический патрон или в коаксиальную линию и погружают их в волновод. Так как максимальный размер волновода, применяемого на миллиметровых волнах, не превышает 7 *мм*, то в данном случае такие конструкции трудно выполнимы и малоэффективны. Целесообразнее кристаллический детектор помещать вне волновода в объемный резонатор сравнительно больших размеров и между волноводом и резонатором установить связь. Элементом связи может служить канал, прорезанный в корпусе резонатора.

Подобная конструкция показана на рис. 26. Объемный резонатор *1* имеет форму цилиндра, выфрезерованного

в основании камеры детектора. Верхней стенкой резонатора служит диск *2*, в центре которого находится кристалл. Снизу кристалл соединяется с контактной пружиной. Кристалл и пружина на рисунке не показаны.

В резонаторе возбуждаются колебания, электрическое поле которых изображается силовыми линиями в виде концентрических окружностей. По радиусу резонатора укладывается $^3/_4$ стоячей волны возбуждаемых колебаний. Наибольшая напряженность электрического поля находится в месте расположения кристалла. Настройка камеры производится поршнем *3*, который вводится в канал *4*. Кроме того, имеется канал *5* для связи с волноводом. Высота резонатора равна меньшему поперечному размеру волновода, а больший поперечный размер волновода равен ширине канала. Деталь *6* закрывает камеру детектора сверху.

Чувствительность детектора, выражающая отношение выпрямленного тока в миллиамперах к подводимой мощности в милливаттах, зависит от частоты детектируемых колебаний. Чем больше частота колебаний, тем больше они шунтируются емкостью детектора и тем меньше чувствительность. При частоте 50 *гц* чувствительность детектора равна 2 *ма/мвт*, при длине волны 10 *см* она равна 1,5 *ма/мвт*, а при длине волны 1 *мм* равна 1 *ма/мвт*.

Если мощность, подводимая к кремниевому детектору, не превышает 10 *мквт*, то детектор обеспечивает прямую пропорциональность между выпрямленным током и подводимой мощностью. Качество полупроводникового детектора оценивается не только по чувствительности и величине потерь в процессе детектирования, но и по уровню шумов, который нужно сводить до минимума.

В процессе изготовления полупроводниковых детекторов миллиметрового диапазона особое внимание должно быть уделено точности и тщательности изготовления объемных резонаторов, так как от этого зависит величина потерь в камере детектора.

Поскольку высокочастотная граница миллиметрового диапазона волн примыкает к инфракрасным волнам, вполне закономерно, что на наиболее коротких миллиметровых волнах применяются инфракрасные детекторы. Среди них широко распространен пневматический детектор, работа которого основана на изменении объема газа при облучении инфракрасными лучами.

В латунном корпусе *1* пневматического детектора (рис. 27,*а*) находятся полости *2* и *3*, которые сообщаются

между собой через канал *4*. Весь этот объем заполнен газом и закрыт с противоположных сторон двумя пленками коллодия *5* и *6*. Толщина каждой пленки равна 100 Å. Пленка *5* предназначена для поглощения волн, падающих на нее через фильтр инфракрасных лучей *7*; для лучшего поглощения эта пленка зачернена. Другая пленка *6* является детекторной и должна реагировать на интенсивность волн, поступающих в пневматический детектор; эта

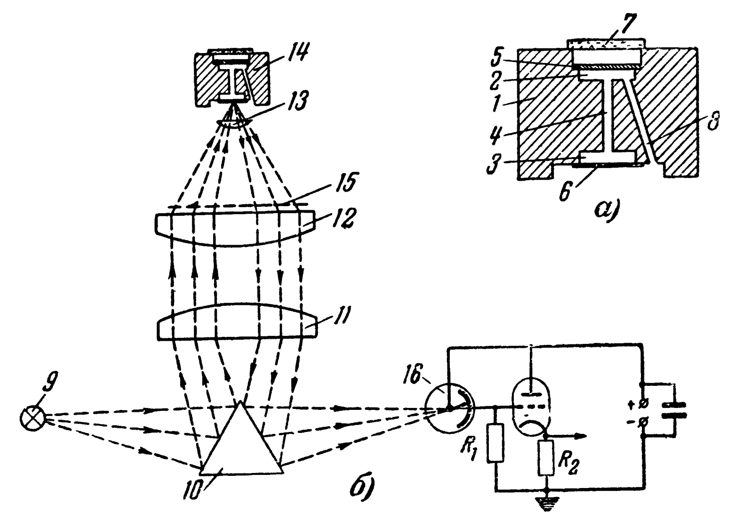


Рис. 27. Пневматический детектор (*а*) и схема установки с его применением (*б*).

1 — корпус; *2* и *3* — полости; *4* — канал; *5* и *6* — пленки коллодия; *7* — фильтр инфракрасных лучей; *8* — уравнительный канал; *9* — источник световых лучей; *10* — призма; *11*, *12* и *13* — линзы; *14* — приемник; *15* — сетка; *16* — фотоэлемент.

пленка покрыта слоем алюминия толщиной в несколько сотен ангстрем путем распыления его в вакууме.

В результате поглощения инфракрасных волн пленкой *5* газ в полости нагревается, давление газа увеличивается, а это через канал *4* и полость *3* деформирует пленку *6*. Расширение пленки *6* фиксируется с помощью оптической системы, показанной на рис. 27,*б*.

Световые лучи источника *9* посредством призмы *10* и собирательных линз *11*, *12* и *13* фокусируются на детекторной пленке, имеющейся в приемнике *14*. Лучи, падающие на эту пленку, отражаются ею и проходят те же линзы, сетку *15* и призму, а затем направляются на фотоэлемент

16. Установка отрегулирована так, что если детекторная пленка не деформирована, то отраженные лучи почти полностью затемняются сеткой и фотоэлемент не освещается. По мере деформации детекторной пленки лучи все более отклоняются от затемненной части сетки и световой поток, падающий на фотоэлемент, увеличивается. Это вызывает появление и увеличение фототока по цепи: плюс источника питания, анод — катод фотоэлемента, сопротивление R_1, минус источника. Падение напряжения на сопротивлении R_1 подается на вход каскада с катодной нагрузкой R_2, в результате чего с сопротивления R_2 снимается напряжение, пропорциональное интенсивности электромагнитных волн, поступающих на детектор.

Для того чтобы не было остаточной деформации пленок, в приемнике предусмотрен уравнительный канал *8* (рис. 27,*а*).

Пневматический детектор реагирует на очень малые мощности (до $5 \cdot 10^{-5}$ *мквт*). Тем не менее этот детектор менее чувствительный и более инерционный, чем полупроводниковый, а потому применяется только в той части миллиметрового диапазона волн, в которой полупроводниковые детекторы использовать нельзя.

11. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Качество приемника миллиметровых волн прежде всего зависит от качественных показателей его первого каскада. Мощность сигнала, принимаемого в этом диапазоне, настолько мала, что она соизмерима с мощностью шумов на входе приемника. Поэтому если в первом же каскаде не удастся создать достаточное превышение сигнала над шумами, то последующее усиление, как бы оно ни было велико, не позволит принять сигнал. Отсюда следует вывод о необходимости избежать больших потерь сигнала в высокочастотной части приемника, что в условиях миллиметровых волн, как показано на примере волноводов и других высокочастотных элементов схем, осуществить довольно трудно.

Так как эффективное усиление миллиметровых волн затруднительно, хотя и возможно при современном состоянии радиоэлектроники, большинство приемников миллиметрового диапазона начинается с детектора или преобразователя частоты. В первом случае имеются в виду приемни-

ки прямого усиления или детекторные, а во втором случае — супергетеродинные.

Выбор той или иной схемы приемника определяется возможностью преобразования частоты с малыми потерями и с малым коэффициентом шума. Если такая возможность имеется, то, как правило, используют супергетеродинную схему, поскольку она обеспечивает значительно бо́льшую чувствительность, чем приемники прямого усиления и детекторные.

На наиболее коротких миллиметровых волнах основным препятствием для получения малых потерь преобразования

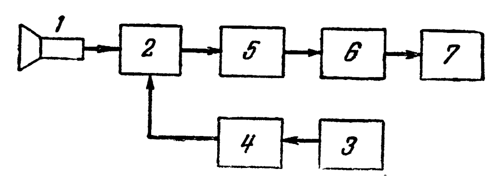


Рис. 28. Блок-схема супергетеродинного приемника 3-*мм* волн.

1 — рупор; *2* — смеситель; *3* — гетеродин; *4* — аттенюатор; *5* — усилитель промежуточной частоты; *6* — детектор; *7* — регистрирующий прибор.

частоты является ничтожно малая мощность гетеродина. Потери при преобразовании уменьшаются с ростом мощности гетеродина и для того, чтобы указанные потери были допустимыми, мощность гетеродина должна быть сравнительно большой, порядка 1 *мвт*. Наряду с этим увеличение мощности гетеродина вызывает обратный эффект: оно влечет за собой повышение коэффициента шума преобразователя, а это вызывает увеличение общего коэффициента шума приемника. Следовательно, должно быть какое-то промежуточное значение мощности гетеродина, при котором чувствительность приемника получается наибольшей. Оптимальная мощность гетеродина примерно равна 0,7—1 *мвт*.

На волнах, длина которых меньше 3 *мм*, гетеродин, если не приняты особые меры для увеличения интенсивности его колебаний, отдает в сотни раз меньшую мощность. Поэтому в наиболее коротковолновой части миллиметрового диапазона преимущественно используются детекторные приемники и приемники прямого усиления, но в ряде случаев находят применение и приемники супергетеродинного типа. Блок-схема такого приемника показана на рис. 28.

Синусоидальный сигнал с частотой f_c = 100 000 *Мгц* (λ = 3 *мм*) принимается рупором *1*, а затем поступает в полупроводниковый смеситель *2*. Сюда же поступают колебания от клистронного гетеродина *3* с частотой $f_{г1}$ = = 25 015 *Мгц*. Если требуется, то эти колебания несколько уменьшаются по мощности в калиброванном аттенюаторе *4*. В смесителе используется четвертая гармоника от основной частоты гетеродина ($f_{г4} = 4 f_{г1} = 100060$ *Мгц*). После преобразования получаются колебания промежуточной

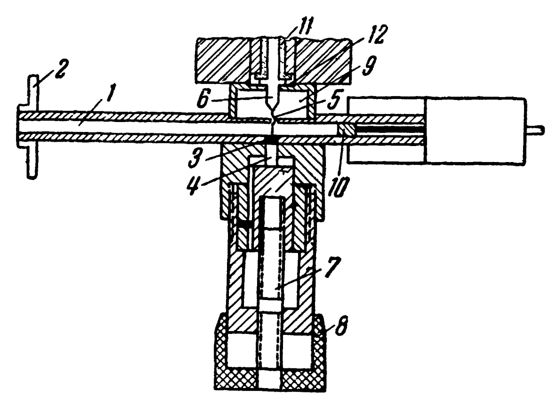


Рис. 29. Эскиз смесителя приемника 3-*мм* волн.
1 — волновод; *2* — фланец; *3* — кристалл; *4* — держатель; *5* — вольфрамовая проволока; *6* — стержень; *7* — винт; *8* — головка; *9* — волновод; *10* — поршень; *11* — коаксиальная линия; *12* — слюдяная шайба.

частоты $f_{г4} - f_c = 60$ *мгц*. Они усиливаются в усилителе промежуточной частоты *5*, после чего проходят обычные преобразования в детекторе *6* и оконечном приборе *7*, каким может быть, в частности, электронно-лучевая трубка.

В данном случае клистронный гетеродин работает на волне λ = 1,25 *см*, благодаря чему мощность его достаточно велика (50—60 *мвт*), чтобы даже после четырехкратного умножения частоты обеспечить эффективную работу преобразователя.

Конструкция смесителя в упрощенном виде показана на рис. 29. Волновод *1*, рассчитанный на пропускание волн λ = 3 *мм*, посредством фланца *2* сочленяется с отрезком волновода, ведущим к приемному рупору. На пути распространения волн в волноводе *1* находится детекторная пара — кристалл *3*, впрессованный в держатель *4*, и вольфрамовая проволока *5*, закрепленная в стержне *6*. Давление

в контакте между проволокой и кристаллом можно регулировать винтом *7*, который вращается при помощи головки *8*.

На детекторную пару одновременно поступают колебания гетеродина через волновод *9*, рассчитанный на пропускание волн, длина которых $\lambda = 1,25$ *см*. Оба волновода (*1* и *9*) настраиваются посредством поршней. Один из них — поршень *10*, настраивающий 3-*мм* волновод, показан на рисунке.

Колебания промежуточной частоты, полученные в результате преобразования, выводятся через коаксиальную линию *11*. Провода коаксиальной линии изолированы по постоянному току слюдяной шайбой *12*. Эта же шайба служит для создания емкости, через которую могли бы замкнуться высокочастотные составляющие тока, получающиеся в процессе преобразования.

Следует обратить внимание на то, что в конструкцию смесителя пришлось ввести два волновода, так как для преобразования частоты используются гармоники гетеродина. Если бы в смеситель вводились колебания основной частоты гетеродина, то разность частот сигнала и гетеродина была бы достаточно малой, чтобы колебания сигнала и клистронного генератора можно было пропустить через один и тот же волновод.

Теперь рассмотрим другую конструкцию преобразователя частоты, разработанную для применения в диапазоне волн $\lambda = 4—7$ *мм* (рис. 30) Основой этой конструкции является стандартный волновод *1*, в котором соединяются держатель полупроводникового детектора *2*, коаксиальная линия *3*, предназначенная для вывода колебаний промежуточной частоты, цилиндр *4*, регулировочный поршень *5* и винт с накатанной головкой *6*. Детали *4, 5* и *6* служат для фиксации держателя детектора в волноводе после их настройки; они закрываются крышкой *7*.

Держатель детектора (рис. 31) представляет собой позолоченную пластину *1* толщиной 1,6 *мм*, содержащую детекторную пару и стержень для вывода колебаний промежуточной частоты. В пластине держателя прорезано окно *2* сечением $0,8 \times 0,6$ *мм*, которое служит продолжением основного волновода, когда в него вставлен держатель. С одной стороны волноводного окна запрессован никелевый стержень *3*. К стержню приварена контактная пружина *4*, изготовленная из вольфрама. С другой стороны окна вмонтирован медный стержень *5* с запрессованной в не-

го пластинкой кремния. Пластинка имеет толщину 0,06 *мм*. При монтаже держателя между пружиной и кремниевой пластинкой создается весьма плотный контакт.

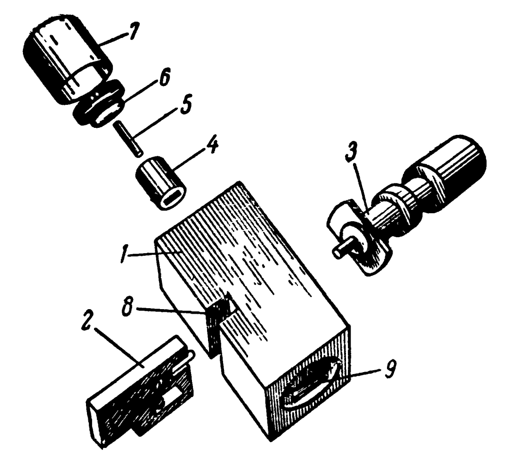


Рис. 30. Основные элементы преобразователя миллиметровых волн, содержащего детектор, вафельного типа.

1 — волновод; *2* — держатель; *3* — коаксиальная линия; *4* — цилиндр; *5* — поршень; *6* — винт; *7* —крышка; *8* — прорезь; *9* — канал.

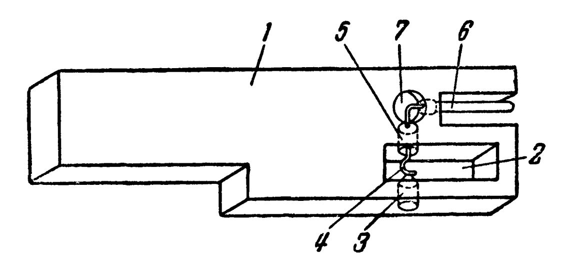


Рис. 31. Держатель детектора вафельного типа.

1 — позолоченная пластина; *2* — окно, *3* — никелевый стержень; *4* — контактная пружина; *5* — медный стержень; *6* — полый медный стержень; *7* — окно.

Стержень *5* изолирован от держателя пластмассой, относящейся к группе фторопластов, которая отличается высокими изоляционными свойствами. Кроме того, имеется медный стержень *6*, аналогичным способом (через пластмассу) вмонтированный держатель. Этот стержень, по-

лый внутри, служит для вывода преобразованных колебаний. Через цилиндрическое окно *7* стержни *5* и *6* соединяются между собой посредством пайки.

Возвратимся к рис. 30. Когда держатель *2* вставлен в прорезь *8*, то прямоугольное окно держателя, имеющее несколько большее сечение, чем волноводный канал *9*, служит его продолжением. В связи с этим контактная пружина и кристалл детектора оказываются в полях принимаемого сигнала и гетеродина, распространяющихся через волноводный канал. Высокочастотные составляющие тока детектора замыкаются через емкость в 2 *пф*, образованную благодаря изоляции из пластмассы, а колебания промежуточной частоты поступают в коаксиальную линию, наружный провод которой соединяется с корпусом волновода и держателя, а внутренний провод охватывается полым выходным стержнем держателя.

Описанная конструкция позволяет перемещением держателя детектора в прорези основного волновода регулировать активную составляющую сопротивления детектора и тем самым согласовывать его с волноводом. Реактивную составляющую сопротивления детектора компенсируют поршнем, имеющимся в выходной коаксиальной линии. Такой способ настройки значительно проще применяемых в других конструкциях. Электрические характеристики описанного преобразователя сравнительно высокие: потери преобразования 5,3, а коэффициент шумов 2,2.

12. УСИЛЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Основными требованиями, предъявляемыми к усилителям миллиметровых волн, являются их широкополосность, малый уровень шумов, большой коэффициент усиления и высокий к. п. д. Последнее существенно только при получении сравнительно мощных колебаний.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют усилительные лампы с бегущей волной и молекулярные усилители. При усилении миллиметровых волн посредством ламп с бегущей волной особенно сказываются их преимущества в более низком уровне шумов, чем в любом приборе сверхвысоких частот. Отсутствие резонансных элементов в этих лампах позволяет обеспечить любую ширину полосы усиливаемых колебаний, какая может потребоваться на практике.

Вот данные одной из зарубежных усилительных ламп с бегущей волной, которая содержит замедляющую систе-

му типа «гребенка»: длина волны усиливаемых колебаний $\lambda = 6$ *мм*, ускоряющее напряжение 1 200 *в*, выходная мощность 20 *мвт*, коэффициент усиления по мощности 100, ширина полосы усиливаемых колебаний 1 500 *Мгц*.

Рассмотрим молекулярные усилители. Каждая молекула вещества в соответствии с движением электронов относительно ядра атома, взаимным расположением атомов в молекуле, движением в веществе, наличием внешних электрических и магнитных полей и другими факторами обладает определенной энергией. Достаточно одному из этих факторов соответствующим образом измениться, чтобы энергия, сконцентрированная в молекуле, изменилась или, как говорят, молекула перешла с одного энергетического уровня на другой. Такие переходы совершаются скачком, причем каждый переход может сопровождаться испусканием (если энергетический уровень молекулы понижается) или поглощением (если уровень повышается) квантов электромагнитных волн. Между энергией кванта $W_2 - W_1$, поглощенного или излученного молекулой, и частотой колебаний f существует прямая пропорциональность:

$$W_2 - W_1 = hf.$$

Коэффициент пропорциональности h называется постоянной Планка.

Чем ниже энергетический уровень молекулы, тем устойчивее ее состояние. Поэтому, если вещество находится в обычном, невозбужденном состоянии, то наибольшее количество его молекул находится на нижних энергетических уровнях.

Возбужденные молекулы с энергетического уровня $W_в$ стремятся перейти на более устойчивый уровень $W_у$. Для этого достаточно воздействия слабым сигналом на частоте $f_с$, которая соответствует разности уровней $W_в - W_у$:

$$W_в - W_у = hf_с.$$

В связи с указанным переходом произойдет испускание электромагнитных колебаний на той же частоте $f_с$. Если с помощью возбудителя, работающего на частоте $f_в \geqslant f_с$, удалось достаточно сильно нарушить обычное распределение молекул по энергетическим уровням, то с возбужденных уровней $W_в$ на уровни $W_у$ будет переходить настолько

значительное количество молекул, что излучаемая энергия на частоте $f_с$ окажется во много раз больше сигнала, способствовавшего этому излучению, т. е. произойдет усиление сигнала.

При разработке молекулярных усилителей наибольшие трудности представлял подбор материала, обладающего способностями создавать требуемое относительно частот расщепление энергетических уровней. Такими материалами оказались парамагнитные кристаллы при температуре, близкой к абсолютному нулю. Кристалл помещается внутри объемного резонатора, имеющего две резонансные частоты $f_в$ и $f_с$. Объемный резонатор, в свою очередь, находится внутри криостата, поддерживающего требуемую низкую температуру. В резонаторе имеется два ввода — для сигнала и возбуждающего поля. В состав молекулярного усилителя входит также магнит, создающий постоянное магнитное поле в резонаторе. Изменяя это поле, можно смещать энергетические уровни молекул и тем самым настраивать усилитель на частоту усиливаемого сигнала.

Благодаря отсутствию токов проводимости и очень низкой рабочей температуре молекулярные усилители обладают столь низким уровнем шумов, который не может быть получен в электронных усилителях с. в. ч. Полоса пропускания молекулярных усилителей от 1 до 10 *Мгц*, но в пределе может достичь 100 *Мгц*.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

13. РАДИОСВЯЗЬ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Благодаря очень широкому диапазону частот миллиметровые волны могли бы полностью обеспечить потребности многоканальной радиотелефонной и радиотелеграфной связи, дальней передачи радиовещательных и телевизионных программ, системы импульсно-кодовой модуляции и т. д. Этому, однако, препятствует большое затухание, вносимое атмосферой при распространении волн миллиметрового диапазона.

Иногда связь в пределах нескольких километров, которая может быть осуществлена без особых затруднений, является весьма полезной. Наряду с этим возможны и дру-

гие решения. Например, миллиметровые волны можно без больших потерь передавать через круглые и спиральные волноводы, если последние возбуждаются на волне TE_{01}. Такие линии существуют: они позволяют установить связь на расстоянии до 60 *км* при наличии 1 000 радиотелефонных каналов.

Можно было бы добиться еще большего эффекта, если бы в этих волноводных линиях не возникало множество других нежелательных типов волн, которые необходимо отфильтровывать. Обилие различных типов волн объясняется тем, что в целях уменьшения потерь диаметр волновода выбирают сравнительно большим, вследствие чего для многих типов волн поперечные размеры волновода оказываются больше критических.

Имеется стремление создать сеть ретрансляционных станций миллиметровых волн подобно тем, которые в настоящее время получают широкое применение на более длинных волнах диапазона сверхвысоких частот. В целях увеличения расстояния между соседними станциями их рассчитывают на диффузное распространение радиоволн, т. е. на рассеяние волн в тропосфере (нижних слоях атмосферы). Напряженность поля рассеиваемых волн по мере удаления от передающей антенны убывает значительно быстрее, чем при обычном способе распространения радиоволн, а поэтому такого рода ретрансляционные станции должны иметь мощные передатчики и антенны с большим коэффициентом усиления. Расчеты показывают, что для сравнительно устойчивого приема сигналов в радиусе 160 *км* на волнах порядка 8 *мм* достаточно применить передатчик мощностью 1 *вт* и антенну в виде параболоида вращения диаметром 20 *м*. Создание подобных антенн в настоящее время вполне возможно, а генерирование непрерывных колебаний такой, казалось бы, малой мощности значительно труднее. Современная техника миллиметровых волн позволяет на 8-*мм* волнах осуществить радиосвязь в пределах дальности 100 *км*, но эта связь недостаточно надежна.

14. ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАДИОАСТРОНОМИИ

Прогресс техники сверхвысоких частот способствовал интенсивному развитию новой науки — радиоастрономии, которая занимается исследованием небесных тел радиотех-

ническими средствами. Эти исследования ведутся по двум направлениям. Одно из них основано на собственном излучении радиоволн небесными телами (космическими объектами), а второе направление основано на наблюдении радиоволн, посланных с Земли и отраженных от космических объектов.

Процесс излучения радиоволн небесными телами можно объяснить следующим образом. В каждом теле, в том числе и космическом, если оно содержит в большом количестве электроны, слабо связанные с ядрами атомов (электроны проводимости), наблюдается беспорядочное движение таких электронов. В процессе хаотического движения электронов вследствие действия внутриатомных электрических полей их скорость резко изменяется, а это эквивалентно резким изменениям тока в проводнике. В таких случаях, как известно, возбуждаются электромагнитные волны. Чем выше температура тела, тем более резкие возмущения испытывают свободные электроны и тем интенсивнее электромагнитное излучение.

Так как полученное излучение имеет характер импульсов, то оно может быть представлено в виде суммы множества синусоидальных колебаний различных частот. Спектр частот электромагнитного излучения охватывает ультрафиолетовые, световые, инфракрасные лучи и радиоволны. Интенсивность излучения на разных частотах различна: она максимальна на световых волнах, резко уменьшается в сторону ультрафиолетовых волн и более плавно уменьшается в сторону инфракрасных волн.

Несмотря на то, что радиоизлучение космических объектов значительно слабее, чем их световое излучение, возможности радиоастрономии в ряде случаев оказываются шире возможностей астрономии оптическими средствами. Причиной тому является более высокая чувствительность радиоприемников по сравнению с чувствительностью оптических приемников. Преимущества радиоастрономии особенно сказываются при исследовании холодных космических объектов (например, Луны), так как с понижением температуры интенсивность излучения в области световых волн падает примерно в пятой степени, а в радиотехническом диапазоне — только в первой степени от температуры. Практически световое излучение холодных тел не наблюдается, а радиоизлучение этих тел может быть подвергнуто исследованию.

Ультрафиолетовые и инфракрасные лучи очень сильно

поглощаются земной атмосферой. Радиоволны, длина которых больше 15 *м*, отражаются обратно к космическим объектам от ионизированных слоев атмосферы (ионосферы). Следовательно, наблюдение с Земли можно осуществить только над излучением световых волн и тех радиоволн, длина которых начинается примерно с 2 *мм* и кончается 15 *м*.

Радиоизлучение Солнца в большой мере зависит от его активности. В «спокойном» состоянии интенсивность солнечного излучения на всем диапазоне волн, пригодном для радиоастрономических наблюдений, примерно одинаковая. Когда же на Солнце появляются пятна и активность его увеличивается, то мощность радиоизлучения по мере изменения длины волны изменяется. Эти изменения особенно заметны на метровых волнах, тогда как на волнах от 2 *мм* до 2 *см* мощность излучения Солнца почти остается постоянной, что значительно облегчает наблюдения.

Возможности радиоастрономии определяются не только интенсивностью радиоизлучения космических объектов и поглощением радиоволн в атмосфере, но и качеством приемной аппаратуры. Здесь имеются в виду антенна и приемник радиотелескопа.

Антенна радиотелескопа должна иметь максимально возможную направленность. Это необходимо по двум причинам. Во-первых, чем больше направленность антенны, тем больше энергии улавливается от излучающего объекта, на который направлена антенна. Во-вторых, чем острее диаграмма направленности антенны, тем больше разрешающая способность телескопа, т. е. тем меньше угол между объектами или участками одного объекта, которые можно наблюдать раздельно. Для того чтобы понять важность этого требования, обратимся к такому примеру. Благодаря тому, что был создан радиотелескоп, антенна которого имеет ширину диаграммы направленности меньшую, чем телесный угол, под которым видно Солнце с Земли, удалось исследовать различные участки Солнца и установить, что температура этих участков неодинаковая и спектр их излучения различный. В частности, излучение на волне 6 *мм* наблюдалось с участков Солнца, имеющих температуру около 4 500° К.

Антенны радиотелескопов, как и оптических телескопов, представляют собой рефлектор в виде параболоида вращения и облучатель, помещенный в фокусе рефлектора. Направленность такой антенны тем выше, чем больше диа-

метр параболоида по сравнению с длиной волны. Так как световые волны имеют значительно меньшую длину волны, чем радиоволны, то разрешающая способность оптических телескопов практически недосягаема для радиотелескопов. Очевидно, что радиотелескопы по своей разрешающей способности могут более всего приблизиться к оптическим телескопам, если они работают на миллиметровых волнах, поскольку эти волны наиболее короткие из применяемых в радиотехнике. Так, например, с помощью параболической антенны диаметром 15 *м*, установленной в радиотелескопе, работающем на волне $\lambda = 8$ *мм*, удалось получить диаграмму направленности шириной в 3′, т. е. в 10 раз меньшую угловой ширины Солнца (0,5°).

Эффективным средством повышения направленности антенны является применение интерферометров, т. е. систем, содержащих антенны, расположенные на определенном расстоянии друг от друга. Если даже каждая антенна, входящая в интерферометр, ненаправленная, то интерферометр в целом получается направленным. С изменением направления изменяется разность расстояний, пройденных волнами до отдельных антенн, изменяется разность фаз этих волн и результирующее электромагнитное поле то усиливается, то ослабляется. Диаграмма направленности становится многолепестковой. Чем больше расстояние (база) между отдельными антеннами, тем выше направленность интерферометра.

Приемники радиотелескопов миллиметровых волн существенно не отличаются от приемников радиотелескопов более длинных волн. И в тех и в других выходным прибором служит миллиамперметр или осциллограф, показания которых могут быть автоматически записаны. Эти приемники должны быть рассчитаны на очень широкую полосу пропускания, так как радиоизлучение космических объектов имеет сплошной спектр. Для обнаружения этого излучения на фоне внутренних и внешних шумов принимаемые колебания подвергаются модуляции в самом приемнике.

Рассмотрим к примеру блок-схему приемника радиотелескопа, посредством которого на волне $\lambda = 1{,}25$ *см* ($f = 24\,000$ *Мгц*) исследовалась поверхность Луны (рис. 32). Из приемной антенны, содержащей параболический рефлектор *1* и рупор *2*, который помещен в фокусе рефлектора, сигнал поступает в волновод *3*, а через него в полупроводниковый смеситель *4*. Электродвигатель *5* со скоростью 1 500 *об/мин* (25 *об/сек*) вращает заслонку *6*. Последняя

периодически перекрывает волновод и тем самым изменяет амплитуду сигнала с частотой 25 *гц*.

Кроме принимаемых сигналов в смеситель подаются колебания гетеродина *7*, стабилизированного по частоте каскадом *8*. Сигналы промежуточной частоты (30 *Мгц*), полученные в результате преобразования, проходят предварительный усилитель *9*, а затем — основной усилитель *10*.

В детекторе *11* выделяется огибающая этих сигналов, после чего следует каскад *12* — усилитель колебаний, имеющих частоту 25 *гц*. Каскад *13* представляет собой синхронный выпрямитель, на который подаются два напряже-

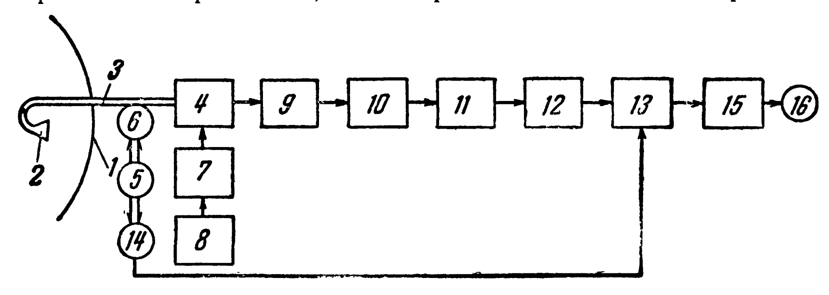


Рис. 32. Блок-схема радиотелескопа, работающего на волне $\lambda = 1{,}25$ *см*.

1 — рефлектор; *2* — рупор; *3* — волновод; *4* — смеситель; *5* — электродвигатель; *6* — заслонка; *7* — гетеродин; *8* — стабилизатор; *9* — предварительный усилитель; *10* — основной усилитель; *11* — детектор; *12* — усилитель; *13* — синхронный детектор; *14* — генератор; *15* — усилитель; *16* — регистратор.

ния одинаковой частоты 25 *гц*: одно напряжение, полученное после указанных преобразований в приемнике, и другое — непосредственно от генератора *14*, приводимого во вращение от того же электродвигателя, что и волноводная заслонка. На выходе выпрямителя получается постоянный ток, пропорциональный амплитуде сигналов на входе приемника. Этот ток усиливается в каскаде *15* и фиксируется миллиамперметром *16*.

Астрономические наблюдения, произведенные на миллиметровых волнах, дали много полезных сведений о Солнце, Луне и земной атмосфере. В частности, измерения, произведенные в 1956—57 гг. на волне $\lambda = 4{,}3$ *мм*, позволили вычислить температуру Солнца и Луны (для данной волны) с учетом затухания электромагнитных волн в атмосфере. Средняя температура Солнца оказалась равной 5 605° К, а Луны 202° К. Поглощение в земной атмосфере при вертикальном падении волн длиной 4,3 *мм* характеризовалось

величиной 1,6—2,2 *дб*. Измерения показали также, что излучение миллиметровых волн Солнцем происходит за пределами его видимой поверхности от ионизированных газов, примыкающих к солнечному диску.

15. РАДИОНАВИГАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Длительное время в авиации и особенно при мореплавании основным навигационным прибором являлся оптический секстант, предназначенный для ориентировки по звездам и Солнцу. Этот секстант обладает высокой точностью, но может быть использован только при оптической видимости звезд или Солнца, а также горизонта.

В последние годы был разработан радиосекстант, который выгодно отличается от оптического тем, что позволяет ориентироваться по Солнцу независимо от его оптической видимости. Для того чтобы показания радиосекстанта зависели только от положения Солнца относительно прибора, интенсивность радиоизлучения Солнца на рабочей волне радиосекстанта должна быть устойчивой и независимой от солнечной активности. Это имеет место, как сказано выше, в диапазоне волн $\lambda=2$ *мм*—2 *см*.

Выбор рабочей длины волны радиосекстанта определяется не только этими соображениями. Поскольку энергия радиоволн, излучаемых Солнцем, по мере их распространения рассеивается во все большем пространстве и частично поглощается в атмосфере, антенна радиосекстанта улавливает очень малую мощность. Вместе с тем трудно увеличить чувствительность приемника из-за необходимости производить прием в широком спектре частот радиоизлучения Солнца. Следовательно, остается повысить коэффициент усиления антенны, а для этого антенна должна быть остронаправленной.

Высокая направленность антенны создает и другие преимущества: если антенна благодаря своей направленности будет принимать электромагнитные волны только в направлении к Солнцу, то различные помехи за пределами этого направления улавливаться не будут и, таким образом, понизится уровень помех.

Для того чтобы диаграмма направленности антенны была сконцентрирована на Солнце и не выходила за его пределы, ширина диаграммы должна быть не более 0,5°.

В радиосекстанте применяется антенна с рефлектором в виде параболоида вращения. Между шириной диаграм-

мы направленности этой антенны θ и диаметром параболоида d существует следующая зависимость:

$$\theta^{\circ}=70\ \frac{\lambda}{d}.$$

Пользуясь этой формулой, можно убедиться в том, что даже при такой сравнительно небольшой длине волны, как $\lambda=10$ *см*, диаметр параболоида в данном случае должен быть очень большим:

$$d=\frac{70\lambda}{\theta^{\circ}}=\frac{70\cdot 10}{0,5}=1\ 400\ см.$$

Если же радиосекстант работает на волне 1,8 *см* или 8,7 *мм*, как это имеет место в действительности, то диаметр рефлектора соответственно равен 252 и 122 *см*, что вполне приемлемо.

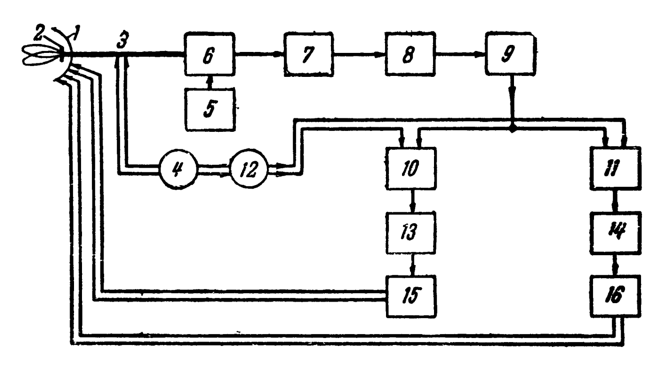


Рис. 33. Блок-схема радиосекстанта.

1 — рефлектор; *2* — облучатель; *3* — волновод; *4* — электродвигатель; *5* — гетеродин; *6* — смеситель; *7* — усилитель промежуточной частоты; *8* — детектор; *9* — усилитель; *10* и *11* — фазовые детекторы; *12* — генератор; *13* и *14* — электромашинные усилители; *15* и *16* — электродвигатели.

Таким образом, радиосекстант принципиально и конструктивно выполним только на миллиметровых или на наиболее коротких сантиметровых волнах.

Рассмотрим блок-схему радиосекстанта (рис. 38), пользуясь одновременно графической иллюстрацией его работы (рис. 34).

Радиосекстант в основном представляет собой систему автоматического сопровождения по направлению, какая широко применяется в радиолокационных станциях орудийной наводки. Задача системы заключается в том, чтобы

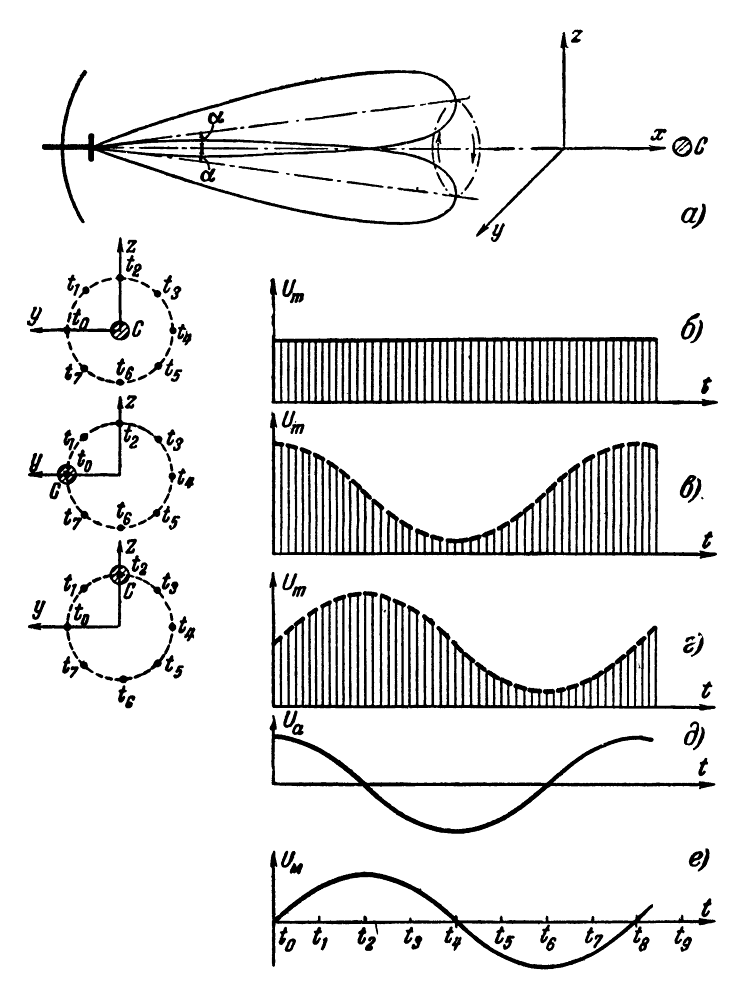


Рис. 34. Автоматическое сопровождение Солнца в радиосекстанте.

заставить антенну автоматически следовать за движением определенного объекта. В данном случае этим объектом является Солнце.

Антенна радиосекстанта содержит параболический рефлектор *1* и облучатель *2*, который соединяется через волновод *3* с приемником и вращается от электродвигателя *4*. Облучатель смещен относительно оси рефлектора, поэтому ось диаграммы направленности находится под углом α к оси x (рис. 34,*а*). В процессе вращения антенны ее диаграмма направленности описывает в пространстве конус.

Возьмем какую-нибудь точку диаграммы направленности антенны, которая, вращаясь по часовой стрелке, пересекает координатную ось y в начальный момент периода вращения t_0, координатную ось z в момент t_2 и т. д. Теперь рассмотрим, как влияет место расположения центра Солнца C относительно оси x на изменения амплитуды U_m радиочастотных колебаний Солнца, улавливаемых антенной радиосекстанта.

Если центр Солнца C находится на оси x (рис. 34,*б*), то амплитуда U_m не изменяется. Поэтому ось x называется равносигнальной осью. Когда точка C смещена по азимуту (в горизонтальной плоскости), как показано на рис. 34,*в*, то в момент t_0 амплитуда U_m максимальна, через полпериода (t_4) — минимальна, а в моменты времени t_2 и t_6 амплитуда U_m имеет среднюю величину. Если же точка C смещается только в вертикальной плоскости (по углу места), то, как видно из рис. 34,*г*, наиболее интенсивное излучение Солнца улавливается в момент t_2, наименее интенсивное излучение имеет место в момент t_6, а в моменты t_0, t_4 амплитуда U_m имеет среднюю величину.

Полученные амплитудно-модулированные колебания, так же как колебания гетеродина *5*, подаются в полупроводниковый смеситель *6*. В результате получаются колебания промежуточной частоты, которые усиливаются в каскадах *7*, а затем подаются на детектор *8*. После детектирования получается напряжение, соответствующее огибающей высокочастотных колебаний, улавливаемых антенной радиосекстанта. Это напряжение, называемое сигналом ошибки, поступает в усилитель *9*. Благодаря тому, что усилитель содержит фильтр, настроенный на частоту сигнала ошибки, посторонние шумы, не обусловленные изучением Солнца, значительно понижаются.

Амплитуда выходного напряжения усилителя тем больше, чем больше угол отклонения центра Солнца от равносигнальной оси, а начальная фаза этого напряжения зависит от того, в каком направлении (по азимуту и углу места) произошло указанное отклонение.

В дальнейшем необходимо получить два постоянных напряжения, из которых одно должно быть пропорционально отклонению Солнца от равносигнальной оси по азимуту, а другое — по углу места. Для этого предусмотрены два фазовых детектора *10*, *11*, на которые подаются усиленный сигнал ошибки и одно из опорных напряжений, выработанных специальным генератором *12*. Последний приводится во вращение от того же электродвигателя, что и облучатель, благодаря чему частота опорных напряжений и сигнала ошибки одинаковая. Опорные напряжения азимута $U_а$ (рис. 34,*д*) и угла места $U_м$ (рис. 34,*е*) сдвинуты по фазе на 90° и их начальная фаза отрегулирована так, что опорное напряжение азимута полностью совпадает с сигналом ошибки тогда, когда Солнце отклоняется от равносигнальной оси только по азимуту. Если же Солнце сместилось только по углу места, то сигнал ошибки полностью совпадает по фазе с опорным напряжением по углу места (ср. на рис. 34 графики *в*, *д* и *г*, *е*).

Принцип действия фазового детектора таков, что его выходное напряжение максимально при сдвиге по фазе между входными напряжениями, равном 0° (180°), а по мере изменения этого сдвига до 90° (270°) выходное напряжение детектора уменьшается до нуля. Таким образом, детектор *10* реагирует только на составляющую сигнала ошибки, соответствующую отклонению Солнца по азимуту, а на выходе детектора *11* получается постоянное напряжение, пропорциональное отклонению по углу места. Эти напряжения недостаточны для воздействия на электродвигатели сопровождения по азимуту (*15*) и углу места (*16*), в связи с чем между фазовыми детекторами и электродвигателями включены электромашинные усилители (амплидины) *13* и *14*.

Электродвигатели *15* и *16* механически связаны с антенной. Усиленный сигнал ошибки подается на электродвигатели с таким знаком, чтобы вызванное ими вращение антенны устраняло сигнал ошибки, а для этого равносигнальная ось должна проходить через центр Солнца. Отсюда следует вывод, что с помощью приборов, измеряющих уг-

ловое положение антенны, можно судить о направлении Солнца. Это и требуется для целей навигации.

Внешний вид зарубежного экспериментального радиосекстанта, работающего на волне 8,7 *мм*, показан на рис. 35.

Одной из конструктивных особенностей радиосекстанта является размещение его на платформе, стабилизированной в пространстве. Это требуется для того, чтобы качка корабля или самолета не отражалась на показаниях прибора. Габариты радиосекстанта должны быть минимальными, особенно если он предназначен для установки на самолете. С этой точки зрения волну 8,7 *мм* следует считать более пригодной, чем волну 1,9 *см* для применения в самолетном радиосекстанте. Практика показала, что на волне 1,9 *см* прибор работает совершенно безотказно и устойчиво, а на волне 8,7 *мм* несколько хуже во время сильного дождя и грозы. В этом случае понижается точность показаний за счет «размывания» диаграммы направленности. Если имеется необходимость, то диаметр рефлектора антенны самолетного радиосекстанта можно уменьшить до 30 *см*.

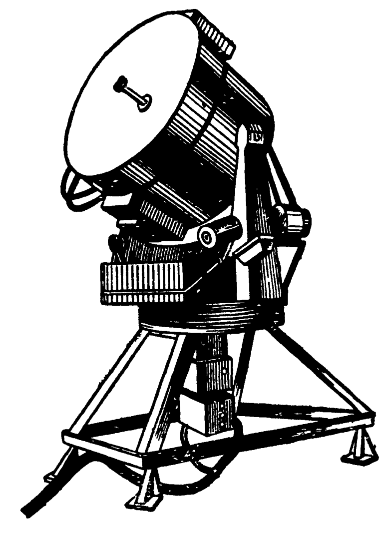


Рис. 35. Экспериментальный радиосекстант, работающий на волне 8,7 *мм*.

Обобщая сказанное, следует подчеркнуть, что изобретение радиосекстанта предоставило в распоряжение штурмана корабля и экипажа самолета весьма ценный навигационный прибор.

16. ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

Радиоспектроскопия — область радиотехники, занимающаяся изучением спектров излучения и поглощения электромагнитных волн различными веществами. Задача радиоспектроскопии, как и оптической спектроскопии, заключает-

ся в том, чтобы исследовать, на каких частотах производится излучение и поглощение электромагнитной энергии в данном веществе и как распределяется эта энергия по частотам, т. е. в нахождении соответствующих спектров. Если линии спектра могут быть разделены, то спектр называется линейчатым, а если эти линии сливаются в полосы, то спектр называется полосатым, сплошным или непрерывным.

С образованием спектра мы, по существу, уже сталкивались. Нам известно, что при определенных условиях молекулы данного вещества способны перейти с одного энергетического уровня на другой и тогда происходит испускание или поглощение электромагнитных колебаний вполне определенной частоты, т. е. спектр будет линейчатым.

Так как частоты спектра находятся в прямой связи с энергетическими уровнями атомов и молекул, которые, в свою очередь, зависят от их структуры, то спектроскопия дает возможность установить природу того или иного вещества.

Радиоспектроскопия таит в себе огромные возможности познания природы. Те радиоастрономические наблюдения, о которых говорилось в настоящей брошюре, заключаются в измерении и анализе спектра излучения небесных тел. Самые точные часы — атомные были разработаны в результате спектрального анализа аммиака. Этот же анализ позволил создать молекулярные генераторы, отличающиеся необычайно высокой стабильностью частоты. Благодаря исследованию спектров твердых тел, содержащих парамагнитные ионы, удалось разработать молекулярные усилители, способные принимать весьма слабые сигналы. Устойчивость структуры молекул позволяет использовать спектральные линии как первичные и вторичные стандарты частоты. Радиоспектроскопия в такой мере совершенствуется, что она уже позволяет производить химический и изотопический анализ, т. е. по спектру вещества можно судить о его химическом составе или о наличии изотопов элементов.

Оптические спектроскопы исследуют спектры только в диапазоне частот видимого света. Этого явно недостаточно, так как в ряде случаев атомы и молекулы поглощают и излучают электромагнитные волны, нижняя (по частоте) граница которых находится в области миллиметровых волн. Например, линия поглощения окиси углерода $C^{12}O^{16}$ примерно соответствует длине волны $\lambda = 2{,}7$ *мм*.

Спектроскопия на миллиметровых волнах оказывается незаменимой при изучении тяжелых молекул, спектры которых лежат в миллиметровом диапазоне.

Ознакомимся с блок-схемой радиоспектроскопа, предназначенного для исследования газа (рис. 36). Клистронный генератор *1* через волновод *2* и аттенюаторы *3* и *4* возбуждает электромагнитные волны в газе, наполняющем секцию волновода *5*, которая ограничена слюдяными окнами *6*. По оси газонаполненной секции проходит тонкая изо-

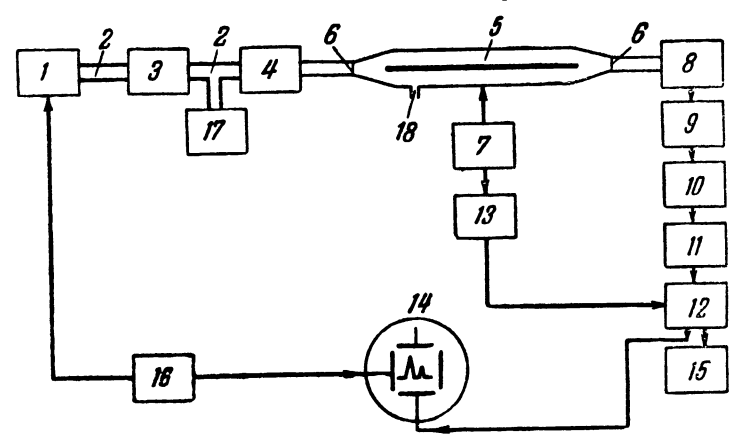


Рис. 36. Блок-схема радиоспектроскопа миллиметровых волн.
1 — клистронный генератор, *2* — волновод; *3* и *4* — аттенюаторы, *5* — волновод; *6* — слюдяное окно, *7* — генератор; *8* — детектор, *9* — предварительный усилитель; *10* — кварцевый фильтр; *11* — основной усилитель, *12* — синхронный детектор, *13* — фазоинвертор; *14* — электронно-лучевая трубка; *15* — записывающее устройство, *16* — генератор пилообразного напряжения, *17* — волномер; *18* — отверстие.

лированная проволока. Между этой проволокой и стенками волновода приложено переменное электрическое поле, которое создается генератором *7*, имеющим частоту колебаний 85 *кгц*. Под влиянием переменного электрического поля спектральные линии периодически смещаются по частоте.

Если генератор *7* не работает и частота колебаний клистрона равна частоте спектральной линии, то в газе происходит наибольшее поглощение электромагнитных волн. Если же генератор включен, то спектральная линия смещается с частотой колебаний этого генератора и поглощение энергии в газе изменяется. В результате на входе полупроводникового детектора *8* появляется амплитудно-модулированный сигнал.

В данном случае используется приемник прямого усиления с очень узкой полосой пропускания (1,5 *кгц*). С выхода детектора снимается напряжение, имеющее частоту 85 *кгц*. Оно проходит предварительный усилитель той же частоты *9*, кварцевый фильтр *10*, основной усилитель *11* и синхронный детектор *12*. На этот же детектор поступают колебания с частотой 85 *кгц*, которые следуют от генератора *7* через фазоинвертор *13*. На выходе синхронного детектора получается постоянное напряжение, пропорциональное интенсивности спектральной линии. Это напряжение подается на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки *14* и на записывающее устройство *15*.

Для наблюдения спектральных линий на экране трубки предусмотрен генератор пилообразных колебаний *16*, которые одновременно подаются на отражатель клистрона *1* и на горизонтально отклоняющие пластины трубки. Благодаря этому происходит развертка электронного луча по горизонтали и синхронно изменяется частота колебаний клистрона. Следовательно, по горизонтальной оси экрана трубки можно нанести шкалу частот и, поскольку вертикальный всплеск электронного луча появляется только в момент совпадения частот клистронного генератора и спектральной линии, на экране трубки воспроизводится спектр исследуемого газа.

Измерение частоты клистронного генератора осуществляется посредством отдельного волномера *17*, который связан с волноводом *2*. Вакуумная система подключается к волноводу *5* через отверстие *18*.

Описанная схема широко применяется на практике, хотя и не является единственно возможной для радиоспектроскопа. Отметим ее особенности.

Для этой схемы характерно применение амплитудной модуляции, основанной на смещении спектральных линий под влиянием электрического поля низкой частоты. Такая модуляция называется молекулярной. Благодаря молекулярной модуляции появилась возможность производить детектирование на частотах порядка 100 *кгц* и этим снизить уровень шумов детектора. Кроме того, уровень шумов понижается уменьшением полосы пропускания приемника до очень малой величины, в связи с чем предусмотрен кварцевый фильтр. Для дальнейшего повышения чувствительности схемы, кроме основного усилителя колебаний на частоте 85 *кгц*, введен предварительный усилитель на той же ча-

стоте. Предварительный усилитель отличается низким уровнем шумов, его входная цепь настраивается в резонанс с колебаниями 85 *кгц*.

В заключение отметим, что в данном случае отпадают ограничения, связанные с условиями распространения радиоволн в атмосфере, а поэтому в радиоспектроскопах используется весь миллиметровый диапазон волн. Более того, имеются данные о спектроскопии на волнах, минимальная длина которых достигает 0,59 *мм*.

17. ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАДИОЛОКАЦИИ

Одним из важнейших качественных показателей радиолокационной станции является ее разрешающая способность по дальности и направлению.

Разрешающая способность станции по дальности прежде всего определяется длительностью рабочего импульса, так как может оказаться, что не успеет закончиться прием импульса, отраженного от одного объекта, как наступит прием импульса, отраженного от другого объекта. В результате отметки этих импульсов сольются на экране трубки. Играет роль также разрешающая способность трубки индикатора, поскольку электронный луч создает на экране световое пятно конечных размеров и если диаметр пятна недостаточно мал, то отметки близко расположенных объектов не удастся различить.

Разрешающая способность станции по направлению тем выше, чем меньше ширина диаграммы направленности антенны. В случае уменьшения длительности импульса число гармонических составляющих этих импульсов увеличивается. Соответственно должна быть увеличена полоса пропускания всех высокочастотных звеньев радиолокационной станции. Это, очевидно, осуществляется тем легче, чем больше несущая частота радиоимпульсов. Кроме того, повышение частоты колебаний требуется для увеличения направленности антенны. Следовательно, миллиметровые волны могут обеспечить самую высокую разрешающую способность радиолокационных станций. В этом можно убедиться, сравнивая приводимые ниже данные некоторых современных радиолокационных станций.

По сообщениям зарубежной печати недавно разработана радиолокационная станция 3-*см* диапазона, предназначенная для установки на диспетчерском пункте морского порта, отличающегося очень узкими и длинными проливами. По показаниям индикаторов этой станции диспетчер

порта управляет по радио движением кораблей, входящих в порт и выходящих из него.

В таких условиях особенно важно, чтобы радиолокационная станция отличалась высокой разрешающей способностью. Она определяется малой длительностью импульса 0,05 *мксек*, узкой диаграммой направленности антенны в горизонтальной плоскости (ширина 0,3°) и примененными в станции индикаторами кругового обзора, в которых используются электронно-лучевые трубки, имеющие большой диаметр экрана (38 *см*). Отклоняющая система трубки неподвижная. Наблюдение производится на дальности до 33 *км*.

Так как в вертикальной плоскости не требуется высокой направленности излучения и приема (ширина диаграммы в этой плоскости равна 4°), то имеется возможность примерно в 14 раз уменьшить вертикальный размер антенны по сравнению с горизонтальным. Антенной служит параболический рефлектор, горизонтальный размер которого равен 7,5 *м*. Импульсная мощность передатчика 10 *квт*.

Другая станция, установленная на диспетчерской вышке аэропорта, работает на волне $\lambda = 1{,}25$ *см*. Здесь требуется еще более высокая разрешающая способность, чем в предыдущем случае, так как при оживленном движении в аэропорту установить координаты самолета, бензозаправочной машины и других предметов, находящихся на аэродромном поле, труднее, чем установить расположение корабля в морскому порту. Правда, задача облегчается тем, что дальность действия станции можно уменьшить, поскольку площадь аэродрома меньше площади морского порта. Эти обстоятельства и определили целесообразность перехода к более коротким волнам (1,25 *см*).

В одной из таких станций применяются радиоимпульсы, имеющие длительность 0,02 *мксек* и мощность 30—50 *квт*. Разрешающая способность трубки исчисляется 1 000 строк на диаметр экрана, который достигает 40 *см*. Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости равна 0,25° при размерах рефлектора $3{,}6 \times 1{,}2$ *м*, т. е. ширина диаграммы по сравнению со станцией морского порта уменьшена на 0,05°, несмотря на то, что горизонтальный размер рефлектора сокращен в 2 раза. Станция позволяет определить контуры самолета. Максимальная дальность станции 4,8 *км*.

Примерно такие же данные имеет корабельный радиолокатор 8-*мм* диапазона. В данном случае переход к мил-

лиметровым волнам вызван необходимостью сократить габариты антенны при сохранении высокой разрешающей способности станции, так как возможности размещения антенны на корабле более ограничены, чем в стационарном устройстве. Данные станции следующие: длительность импульсов 0,02 *мксек*, импульсная мощность передатчика 20 *квт*, дальность действия от нескольких метров до 9 *км*, диаметр экрана индикатора 30 *см*, ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 0,3°, в вертикальной плоскости 15—17°. Антенна имеет рефлектор в виде параболического цилиндра длиной (по горизонтали) 180 *см*. Вращение антенны производится со скоростью 40 *об/мин*.

Более подробные сведения имеются о радиолокационной станции Лондонского аэропорта, работающей в диапазоне волн 8,33—8,69 *мм*. В этой станции длительность радиоимпульсов 0,05 *мксек*, импульсная мощность передатчика 12—15 *квт*, ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 23′, а в вертикальной плоскости 14°. Электронно-лучевые трубки имеют диаметр 30 *см*, шкалы индикатора рассчитаны на дальности 0,8, 1,6, 4,8 и 16 *км*. Антенная система станции была описана выше. Напомним, что горизонтальный размер рефлектора антенны равен 1,8 *м*.

Применение миллиметровых волн позволило в такой мере уменьшить размеры антенны, что ее удалось без особых затруднений установить на крыше диспетчерской вышки. Эта вышка расположена в центре аэропорта и имеет высоту 40 *м*. Малая длительность импульса и весьма узкая диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости обеспечили высокую разрешающую способность станции: по дальности около 6 *м* и по азимуту меньше 0,3°. Большая высота установки антенны, отсутствие в ее диаграмме боковых лепестков устранили на экране индикатора непросматриваемые зоны и помехи от местных предметов, окружающих аэродром. Изображение на экране трубки по четкости близко к фотографии.

Благодаря всем этим качествам радиолокационной станции у диспетчера аэропорта появилась возможность не только различать контуры самолета, находящегося на аэродромном поле, но и фиксировать наличие автомашин и даже пешеходов. С помощью радиолокационной станции диспетчер управляет движением в аэропорту на всех этапах взлета и посадки самолетов. По показаниям индикато-

ра станции диспетчер командует выруливанием самолетов на старт, контролирует их взлет, наблюдает за самолетами при их движении с посадочной полосы в ангары, контролирует движение автомашины по территории аэродрома и т. д.

Как видно из блок-схемы (рис. 37), вся станция разделена на следующие основные блоки: передающая и приемная антенны *I*, высокочастотный блок *II*, блок приемника *III*, блок индикатора *IV*, совмещенный с панелью управле-

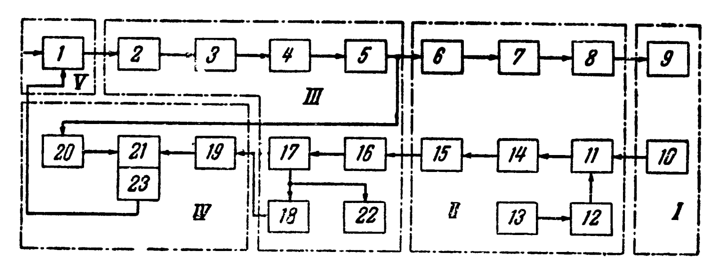


Рис. 37. Блок-схема радиолокационной станции обзора аэродрома, работающей на волне 8 *мм*.

I — антенный блок, *II* — высокочастотный блок; *III* — блок приемника; *IV* — блок индикатора, *V* — блок управления.

1 — каскад стабилизации, *2* — умножители частоты, *3* — мультивибратор; *4* — дифференцирующая схема; *5* — блокинг-генератор; *6* — подмодулятор; *7* — модулятор, *8* — магнетрон, *9* — передающая антенна, *10* — приемная антенна; *11* — смеситель, *12* — аттенюатор, *13* — клистронный гетеродин; *14* — предварительный усилитель, *15* — вращающийся трансформатор; *16* — основной усилитель, *17* — детектор, *18* и *19* — видеоусилители; *20* — схема развертки индикатора, *21* — индикатор кругового обзора; *22* — индикатор, *23* — панель управления.

ния, и блок управления *V*, совмещенный со стабилизатором напряжения мотор-генератора.

Постоянный или переменный ток промышленной частоты преобразуется мотор-генератором в напряжение 80 *в* частоты 1 000 *гц*, которое используется для питания станции. Это же напряжение, стабилизированное каскадом *1*, после четырехкратного умножения частоты в схеме *2* управляет мультивибратором *3*. На выходе мультивибратора получаются прямоугольные колебания, которые дифференцируются в схеме *4*, в результате чего получаются остроконечные импульсы обеих полярностей. Каждый положительный импульс запускает блокинг-генератор *5*. Выходные импульсы этого генератора с амплитудой 80 *в*, длительностью 1 *мксек* и частотой повторения 4 000 *гц* синхронизируют работу всей станции. Они управляют подмодулятором *6* и схемой развертки индикатора *20*.

Подмодулятор, выполненый по схеме блокинг-генератора с формирующей линией, предназначен для получения импульсов длительностью 0,07 *мксек* и амплитудой 1 *кв*. Последние усиливаются в модуляторе *7* до 12 *кв* и в отрицательной полярности подаются на катод магнетрона *8*. Радиоимпульсы магнетрона следуют в передающую антенну *9*. Здесь они преобразуются в электромагнитные волны, которые после отражения улавливаются приемной антенной *10*.

Принятые радиоимпульсы преобразуются в полупроводниковом смесителе *11* в импульсы промежуточной частоты 60 *Мгц*. Для этого в смеситель через регулируемый аттенюатор *12* подаются также колебания клистронного гетеродина *13*. Импульсы промежуточной частоты проходят предварительный усилитель *14*, вращающийся трансформатор *15* и основной усилитель *16*.

Для того чтобы избежать засвечивания центрального участка экрана индикатора, в основном усилителе предусмотрена временная регулировка усиления. При такой регулировке коэффициент усиления увеличивается по мере приема импульсов, отраженных от более дальних объектов, благодаря чему уменьшается интенсивность сигналов, вызванных отражением от растительного покрова и неровностей почвы, прилегающих к радиолокатору. Эти сигналы способны вызвать засвечивание экрана. Кроме того, в главном усилителе вместо линейной амплитудной характеристики может быть получена логарифмическая характеристика.

Последняя означает, что амплитуда выходного напряжения усилителя пропорциональна логарифму амплитуды входного напряжения. Это позволяет сильные сигналы усиливать в меньшей степени, чем слабые, и, таким образом, ослабить помехи, наблюдаемые на экране индикатора вследствие интенсивных отражений от дождя.

После соответствующего усиления импульсы промежуточной частоты преобразуются в детекторе *17* в видеоимпульсы. Далее следуют предварительный *18* и оконечный *19* видеоусилители; с выхода последнего видеоимпульсы поступают на индикатор кругового обзора *21*. Так как развертка индикатора по дальности синхронизирована с запуском передатчика, а развертка по азимуту с вращением антенны (эта цепь на блок-схеме не показана), то по отметкам на экране трубки можно производить отсчет дальности и азимута объектов, расположенных на аэродроме.

Точная настройка приемника производится индикатором *22*, который реагирует на составляющую напряжения, поступающего с выхода видеодетектора *17* и имеющего частоту повторения 4 000 *гц*. Чем точнее настройка приемника (гетеродина *13*), тем больше амплитуда напряжения, снимаемого с видеодетектора на индикатор, и тем больше показания индикатора.

Панель управления станцией *23* совмещена с индикатором. С помощью блока управления *V* производимая коммутация передается в блок приемника *III*, высокочастотный блок *II* и блок антенн *I*. Антенны и высокочастотный блок жестко соединяются между собой для уменьшения длины волноводов и соответствующего уменьшения потерь энергии в них. Вся эта высокочастотная часть станции расположена на крыше диспетчерской вышки и вращается для обзора пространства. Остальная часть радиолокатора находится в помещении диспетчера аэропорта.

Такая конструкция потребовала применения системы скользящих контактов между каскадами *5* и *6* для передачи пусковых импульсов в подмодулятор и передачи других напряжений, необходимых для управления высокочастотной частью станции. Кроме того, пришлось ввести вращающийся трансформатор *15* между предварительным и основным усилителями промежуточной частоты.

Так как индикатор может быть вынесен на некоторое расстояние от основной части станции, то приемник и индикатор разделены на отдельные блоки и видеоусилитель составлен из предварительного и оконечного каскадов. Первый находится в блоке приемника, а второй — в блоке индикатора. Они соединяются коаксиальным кабелем, в связи с чем оконечный видеоусилитель включен по схеме с катодной нагрузкой.

Опыт длительной эксплуатации станции показал, что ее целесообразно применять в любых условиях, даже при наличии хорошей оптической видимости, так как все внимание диспетчера аэропорта может быть сосредоточено на экране индикатора, отчетливо воспроизводящего всю зону аэродрома.

18. НАВЕДЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СНАРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

В связи с развитием электронной и реактивной техники разработаны снаряды, которые летят с большой скоростью, развиваемой реактивным двигателем, и автоматически на-

правляются на цель с помощью специальной аппаратуры.

Существуют различные системы управления снарядами. Большинство из них основано на том, что объект, на который направляется снаряд, является первичным или вторичным источником излучения радиоволн либо тепловых (инфракрасных) лучей. Первичным источником радиоволн может служить объект, содержащий радиолокатор, навигационную или связную радиостанцию; первичным источником теплового излучения является корабль, самолет, различные предприятия и т. д. Вторичным источником радиоволн, объект становится тогда, когда он специально облучается радиолокационной станцией системы наведения снарядов. Эта станция может быть установлена на месте старта снаряда или в самом снаряде.

Радиотехнические системы управления снарядами преимущественно работают в сантиметровом диапазоне волн, и только в последнее время появились сведения о системах наведения снарядов в помощью миллиметровых волн. Эти волны в данном случае выгоднее инфракрасных потому, что они в меньшей степени затухают в атмосфере при наличии метеорологических осадков. Вместе с тем они выгоднее более длинных радиоволн, так как требуют применения меньшей по габаритам и весу аппаратуры и, в частности, антенн.

На рис. 38 показана, опубликованная в зарубежной печати, упрощенная блок-схема управления снарядом, в которой используется интерферометр миллиметровых волн, установленный в носовой части снаряда.

Допустим, что электромагнитная волна, излучаемая или отраженная объектом, на который направляется снаряд, имеет фронт AB, образующий угол θ с линией $БВ$, соединяющей антенны *1* и *2* интерферометра. В случае, если волна достигнет антенны *2*, фронт волны не дойдет до антенны *1* на величину

$$AБ = БВ \cos\theta = d\cos\theta,$$

где d — расстояние между антеннами.

Если бы разность хода волн была равна длине волны λ, то э. д. с., индуктируемые в антеннах, были бы сдвинуты по фазе на угол 360°. Стало быть, при разности хода волн $d\cos\theta$ фазовый сдвиг составляет такую же часть от 360°, какую $d\cos\theta$ составляет от λ, т. е. сдвиг по фазе в индуктируемых э. д. с.

$$\varphi^\circ = \left(\frac{360\, d\cos\theta}{\lambda}\right).$$

Так как d и λ — постоянные величины, то этот угол зависит только от θ, т. е. от направления на объект, излучающий данную электромагнитную волну. Учитывая, что продольная ось снаряда перпендикулярна линии *БВ*, соединяющей антенны, а направление распространения волн всегда перпендикулярно фронту волны, можно сказать, что угол θ является углом между направлением полета снаряда и направлением на объект. Следовательно, сдвиг по фазе между э. д. с., индуктируемыми в антеннах интер-

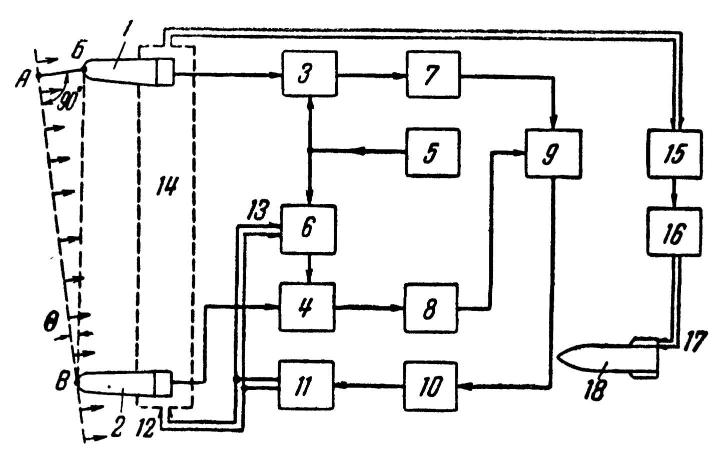


Рис. 38 Упрощенная блок-схема системы управления снарядом с применением интерферометра миллиметровых волн.

1 и *2* — антенны, *3* и *4* — смесители, *5* — общий гетеродин, *6* — фазоинвертор, *7* и *8* — усилители промежуточной частоты; *9* — балансный модулятор, *10* — сервоусилитель, *11* — электродвигатель, *12* и *13* — линии механической связи, *14* — антенная площадка, *15* — гироскоп, *16* — автопилот; *17* — механическая передача, *18* — снаряд.

ферометра, тем больше, чем больше снаряд отклоняется от направления на цель.

Электродвижущие силы, полученные в антеннах *1* и *2*, поступают соответственно в смесители *3* и *4*. Одновременно сюда же подаются колебания от общего гетеродина *5*, причем в смеситель *3* эти колебания подаются непосредственно, а в смеситель *4* — через фазоинвертор *6*. Выходные напряжения преобразователей частоты подаются в соответствующие усилители промежуточной частоты *7*, *8*, а от них в балансный модулятор *9*, который вырабатывает постоянное напряжение, пропорциональное разности фаз между колебаниями на входе модулятора.

Если фазоинвертор изменил фазу на угол Ф, то напряжение на выходе модулятора *9* пропорционально углу $\varphi - Ф$, где φ определяется направлением на объект. Это напряжение следует в сервоусилитель *10*, а от него в электродвигатель *11*, который через линии механической связи *12* и *13* поворачивает антенную площадку *12* и фазоинвертор *6*. Поворот совершается в таком направлении, чтобы напряжение на выходе балансного модулятора уменьшалось до нуля, а для этого должно соблюдаться условие

$$\varphi - Ф = 0.$$

Отсюда следует, что $Ф = \varphi$, т. е. положение фазоинвертора всегда соответствует направлению на объект, но так как ось привода механически связана с фазоинвертором, то вращение оси привода антенны производится в соответствии с углом между направлением полета снаряда и направлением на объект.

Гироскоп *15* вращается вместе с антенной площадкой и измеряет ее угловую скорость. Согласно измеренной скорости система управления полетом (автопилот) *16* через механическую передачу *17* воздействует на рули управления снарядом *18*, а они наводят снаряд в точку встречи с целью.

Описанная система имеет ряд преимуществ. Примененные в устройстве антенны представляют собой диэлектрические (полистироловые) стержни, размеры которых настолько малы, что они легко размещаются в носовой части снаряда, едва выступая над его поверхностью; поэтому антенны не нуждаются в обтекателях. Для обзора пространства не требуется механическая развертка антенны, ее заменяет фазовращатель, который создает необходимый сдвиг по фазе выходных сигналов антенн; благодаря этому снаряд может быть направлен не только на медленно летящую, но и на быстро летящую цель и упрощается конструкция антенного устройства. Система может работать как с импульсными радиолокационными станциями, так и со станциями непрерывного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ближайшие перспективы развития техники миллиметровых волн в значительной степени зависят от того, насколько удастся усовершенствовать способы генерирования и приема волн миллиметрового диапазона.

Современные генераторы миллиметровых волн все еще имеют малую мощность, которая к тому же быстро пони-

жается с ростом частоты генерируемых колебаний. Уже известны генераторы субмиллиметровых волн, но мощность их ничтожна мала. Следует ожидать значительного прогресса в этой области с понижением длины волны колебаний молекулярных генераторов. Ведь для таких генераторов, если и существуют ограничения по частоте, то только со стороны максимальной длины волны.

Все приемники миллиметрового диапазона должны быть рассчитаны на прием очень слабых сигналов, которые иногда ниже уровня шумов приемника. При радиоастрономических, радионавигационнных и радиоспектроскопических измерениях эта трудность в какой-то мере разрешалась модуляцией принимаемых колебаний в приемнике. В дальнейшем, вероятно, чувствительность приемников будет более значительно повышена путем использования молекулярных усилителей. Заметим, что здесь опять потребуются генераторы очень высоких частот, так как частота возбуждения парамагнитных кристаллов должна быть выше частоты усиливаемых сигналов.

Имеются все основания ожидать дальнейшего расширения областей использования миллиметровых волн.

Уже разработаны и нашли практическое применение устройства для получения наносекундных импульсов миллиметровых волн. Это импульсы, длительность которых исчисляется тысячными долями микросекунды. Такие импульсы окажутся весьма полезными в радиолокации для измерения очень малых расстояний. Посредством наносекундных импульсов миллиметрового диапазона можно будет всесторонне исследовать волноводы при возбуждении в них различных типов волн.

Большой интерес, проявляемый в наше время к тайнам атомного ядра и к энергии, которая в нем скрывается, стимулирует быстрое развитие радиоспектроскопии, уровень которой в значительной мере зависит от состояния техники миллиметровых и субмиллиметровых волн. На этих волнах, к примеру, уже ведутся исследования спектров галоидных соединений дейтерия.

Для осуществления массовых космических полетов, начало которым положила советская космическая ракета, необходимы исчерпывающие сведения о небесных телах и об окружающей их среде. Это потребует дальнейшего усовершенствования методов радиоастрономических наблюдений и, в частности, более широкого использования в них техники миллиметровых и субмиллиметровых волн.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 90 к.